

ВЛИЯНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ С АТОМАМИ ВОДОРОДА НА ЭФФЕКТЫ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ЛТР ДЛЯ К I И Ca II В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД

© 2020 г. М. Д. Неретина^{1,2*}, Л. И. Машонкина²,
Т. М. Ситнова², С. А. Яковлева³, А. К. Беляев³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт астрономии РАН, Москва, Россия

³Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 09.07.2020 г.

После доработки 09.07.2020 г.; принята к публикации 23.07.2020 г.

Построена новая модель атома К I с использованием современных атомных данных. Проведены расчеты для К I при отказе от предположения о локальном термодинамическом равновесии (не-ЛТР) для Солнца и трех звезд-карликов с умеренным дефицитом металлов. Для учета неупругих процессов при столкновениях с атомами водорода впервые использованы константы скоростей, рассчитанные с учетом тонкой структуры уровней К I, и проанализировано влияние их применения на не-ЛТР результаты по сравнению с использованием скоростей, рассчитанных для объединенных уровней. В согласии с не-ЛТР исследованиями, имеющимися в литературе, К I подвержен сверхрекомбинации, что ведет к усилению спектральных линий и отрицательным поправкам к содержанию. Показано, что не-ЛТР эффекты ослабевают при использовании новых столкновительных данных. К такому же выводу мы пришли при сравнении не-ЛТР поправок, рассчитанных для линии Ca II 8662 Å в моделях атмосфер с $[Fe/H] = -4.5$ с использованием скоростей процессов столкновений Ca II + H I, полученных с учетом и без учета тонкой структуры уровней Ca II. Но эффект очень мал для двух других линий триплета — Ca II 8498, 8542 Å. Солнечное не-ЛТР содержание $\log \epsilon_K = 5.09 \pm 0.08$, полученное по пяти линиям, согласуется с метеоритным в пределах 0.01 dex. Несмотря на то что в атмосферах исследуемых звезд отклонения от ЛТР больше, чем у Солнца, дифференциальное содержание $[K/H]$ почти не зависит от того, какой набор столкновительных данных используется: рассчитанный с учетом или без учета тонкой структуры уровней К I.

Ключевые слова: атмосферы звезд, формирование спектральных линий в неравновесных условиях, содержание калия в звездах, содержание кальция в звездах.

DOI: 10.31857/S0320010820090053

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние годы наши знания о химической эволюции Галактики были уточнены, благодаря определению содержания различных элементов в атмосферах звезд по наблюдаемому спектру высокого разрешения и теоретическому моделированию процессов нуклеосинтеза. Тем не менее расхождения между наблюдениями и теорией для ряда элементов все еще остаются существенными. Одним из таких элементов является калий (K): наблюдаемое содержание калия в звездах с дефицитом металлов не согласуется с моделями химической эволюции Галактики (см., например, Жао и др.,

2016; Прантцос и др., 2018). Еще одна область, где требуются точные определения содержания калия, — изучение связи между наличием у звезды планет и ее химическим составом. С температурой конденсации около 1000 К калий относится к умеренно летучим элементам (Лоддерс и др., 2009). Лишь очень немногие элементы этой группы могут наблюдаться в звездных спектрах, поэтому знание точного содержания калия в звездах позволяет сделать еще один шаг к пониманию причин различий в химическом составе звезд с планетами и без планет.

Для уточнения наблюдательных данных, которые получают путем сравнения спектров звезд с теоретическими спектрами, формирование линий

*Электронный адрес: neretina.md15@physics.msu.ru

в атмосферах необходимо рассматривать без использования предположения о локальном термодинамическом равновесии, т.е. в рамках так называемого не-ЛТР подхода при наиболее полном учете процессов, определяющих статистическое равновесие (СР) атомов. Разные авторы разрабатывали не-ЛТР методы анализа линий К I: Шукина (1987), Брулс и др. (1992), Такеда и др. (1996), Иванова и Шиманский (2000), Жанг и др. (2006), Андриевский и др. (2010) и Реггиани и др. (2019), и было показано, что учет отклонений от ЛТР ведет к усилению линий К I и отрицательным поправкам к содержанию. Эффект особенно велик для резонансных линий К I 7664 и 7698 Å. Например, не-ЛТР содержание по солнечной линии К I 7698 Å примерно в три раза меньше, чем ЛТР содержание, причем в рамках ЛТР подхода невозможно воспроизвести профиль линии, и приходится сравнивать наблюдаемые и теоретические эквивалентные ширины.

Почему мы вновь обращаемся к не-ЛТР проблеме К I? Точность вычисления профилей и эквивалентных ширин спектральных линий в рамках не-ЛТР подхода зависит от полноты учета всех процессов взаимодействия данного атома с полем излучения и окружающими частицами при расчете СР, а также от точности атомных данных — энергий уровней, вероятностей переходов, сечений фотоионизации и неупругих столкновений. В атмосферах звезд типа Солнца концентрация электронов (N_e) намного меньше концентрации нейтральных атомов водорода (H I), поэтому возбуждение уровней и образование ионов могут происходить в результате столкновений не только с электронами, но и с атомами H I. В течение многих лет не только для К I, но и для других атомов и ионов скорости столкновений с H I рассчитывались в приближении Дравина (1969) по формулам Стинбока и Холвегера (1984). Этот подход критиковался как физически необоснованный (Барклем и др., 2011) и не устраивал звездных спектроскопистов, которым приходилось вводить масштабирующий коэффициент к Дравиновским скоростям и оценивать его эмпирически (см., например, Машонкина и др., 2011). Яковлева и др. (2018) на основе квантовых расчетов впервые получили константы скоростей возбуждения-девозбуждения и реакций перезарядки (образование ионной пары $K I + H I \rightarrow K II + H^-$ и взаимная нейтрализация $K II + H^- \rightarrow K I + H I$) при неупругих столкновениях с H I. Расчеты были сделаны для термов, т.е. без учета тонкого расщепления. Данные Яковлевой и др. (2018) были применены в работе Реггиани и др. (2019) для не-ЛТР анализа линий К I у Солнца и звезд. Но в модели атома термы $4p^2P^\circ$, $3d^2D$ и $5p^2P^\circ$ рассматриваются как состоящие из двух

уровней, и приходится делать предположение о применимости к уровням тонкого расщепления тех скоростей, которые были рассчитаны для термов. Позднее Яковлева и др. (2019) учли тонкую структуру уровней К I и уточнили свои расчеты. Именно это и послужило толчком для новой работы по К I.

Целью настоящей статьи являются построение новой модели атома К I с использованием наиболее современных атомных данных и анализ влияния учета тонкого расщепления уровней при расчете скоростей процессов столкновений К I + H I на определение содержания калия у Солнца и звезд.

Кроме того, в этой работе мы усовершенствуем нашу модель атома Ca I–Ca II (Машонкина и др., 2017) путем включения скоростей процессов столкновений Ca II + H I, рассчитанных Беляевым и др. (2019) с учетом тонкой структуры уровней Ca II, и анализируем эффект на определение содержания кальция по линиям инфракрасного (ИК) триплета Ca II 8498, 8542, 8668 Å. Этот триплет является основой спектроскопических обзоров RAVE (Radial Velocity Experiment; Штейнмец и др., 2006) и Gaia (Перриман и др., 2001), используется как индикатор металличности при изучении разных типов звездных населений нашей Галактики и ее спутников (Штаркенбург и др., 2010), важен для определения параметров звезд с ультранизкой металличностью (Ситнова и др., 2019).

В разделе 2 мы описываем новую модель атома К I и усовершенствованную модель атома Ca I–Ca II, механизмы отклонений от ЛТР для этих атомов. Раздел 3 посвящен анализу солнечных линий К I в разных сценариях формирования линий. Результаты не-ЛТР расчетов для К I и Ca II в звездах приведены в разделе 4. В разделе 5 мы сравниваем свои результаты с имеющимися в литературе. В Заключении приведены наши выводы и рекомендации.

2. Не-ЛТР МЕТОДЫ ДЛЯ К I И Ca II

2.1. Модель атома К I

Мы построили модель атома К I, включающую 46 уровней с главным квантовым числом $n \leq 14$, а также основное состояние К II. В модели учитывается тонкое расщепление низковозбужденных уровней $4p^2P^\circ$, $3d^2D$ и $5p^2P^\circ$. Мы использовали вероятности переходов и энергии уровней из базы данных NIST¹ (Крамида и др., 2019), сечения фотоионизации для уровней с $4s^2S$ по $7s^2S$ из работы Зацаринного и Тайяла (2010). Мы применяем новые данные о скоростях возбуждения при столкновениях с электронами, рассчитанные

¹ <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

методами CCC (convergent close coupling method) и BSR (B-spline R-matrix method) из работы Реггиани и др. (2019). При отсутствии точных данных используются формула ван Регемортера (1962) для разрешенных переходов и эффективная сила столкновений $\Upsilon = 1$ для запрещенных переходов. Для столкновений с H I мы используем скорости, рассчитанные Яковлевой и др. (2019). В настоящей работе рассмотрены пять нижних термов K I до $5p^2P^{\circ}$ (с энергией возбуждения $E_{\text{exc}} = 3.06$ эВ) с учетом их дублетной структуры и все переходы между ними, вызванные столкновениями с H I, а также реакции перезарядки $K I(nl) + H I \longleftrightarrow K II (3p^{61}S) + H^{-}$. Для переходов, отсутствующих в работе Яковлевой и др. (2019), мы учитываем возбуждение при столкновениях с H I, согласно модели Каулакиса (1991). Эти данные любезно предоставлены Х. Реггиани. Далее будем называть эту модель атома основной и обозначать FS.

Так как в статье ставится задача анализа влияния учета тонкой структуры в расчетах столкновений K I + H I, мы сделали модель атома, которая включает те же 46 уровней, но скорости столкновений с H I рассчитываются согласно Яковлевой и др. (2018). Таким образом, предполагается, что скорости одинаковы для переходов одного мультиплета. Обозначим эту модель атома как FS*. Именно такой подход был применен в работе Реггиани и др. (2019).

2.2. Используемые программы

Решение системы уравнений статистического равновесия и переноса излучения в заданной модели атмосферы проводится по программе DETAIL, разработанной Батлером и Гиддингсом (1985) на основе метода ускоренной Λ -итерации. Населенности уровней, полученные путем решения уравнений CP (не-ЛТР) и по формулам Больцмана-Саха (ЛТР), точнее, их отношение $b = n_{\text{NLTE}}/n_{\text{LTE}}$, которое далее будем называть b -фактором, использовались для расчета синтетического спектра в программах SynthV_NLTE (Цымбал и др., 2019) и BinMag².

В этой работе мы использовали одномерные плоско-параллельные модели атмосфер из базы данных MARCS³ (Густафсон и др., 2008). Для заданных $T_{\text{eff}}/\log g/[Fe/H]$ модели получались путем интерполяции с применением алгоритма, размещенного на сайте MARCS.

² <http://www.astro.uu.se/~oleg/binmag.html>

³ <http://marcs.astro.uu.se>

2.3. Не-ЛТР эффекты для K I

Отклонения от ЛТР проявляются как повышенная населенность основного и низковозбужденных уровней атома K I (рис. 1). Эта повышенная населенность вызвана следующими процессами. В ультрафиолетовых переходах между низковозбужденными и высоковозбужденными уровнями оптическая толщина τ становится меньше 1 уже в глубоких слоях, спонтанные переходы начинают доминировать над фотовозбуждением, что сопровождается выходом фотонов. Высоковозбужденные уровни K I тесно связаны с континуумом — основным уровнем K II — посредством столкновительных процессов. Так как K II — доминирующая стадия ионизации для калия, основной уровень K II является своеобразным “резервуаром” электронов. Переходы из K II стремятся компенсировать потери населенностей уровней K I, вызванные спонтанными переходами, электроны начинают, будто по ступенькам — высоковозбужденным уровням K I, “просачиваться” вниз, к самым нижним уровням. Так как сечения фотоионизации основного состояния K I малы, атом не в состоянии бороться с этим “стоком фотонов” (photon suction, согласно Брулс и др., 1992). Данные процессы приводят к тому, что концентрация атомов K I при не-ЛТР становится больше, чем при ЛТР, и можно говорить о сверхрекомбинации. Не-ЛТР эффекты не влияют на концентрацию K II. Это объясняется тем, что K II — доминирующая стадия ионизации для калия.

Нижние уровни K I перезаселены сильнее, чем верхние, что ведет к уменьшению функции источников по сравнению с функцией Планка. Как следствие, спектральные линии калия усиливаются при не-ЛТР. Это означает, что содержание, определяемое в рамках ЛТР, систематически завышается, а не-ЛТР поправки к содержанию $\Delta_{\text{NLTE}} = \log \varepsilon_{\text{NLTE}} - \log \varepsilon_{\text{LTE}}$ — отрицательные.

Рисунок 1 иллюстрирует эффект включения столкновений с атомами H I на статистическое равновесие K I в модели солнечной атмосферы ($T_{\text{eff}}/\log g/[Fe/H] = 5780/4.44/0.00$). Обозначим модель атома, в которой учитываются столкновения только с электронами, как E. В обоих случаях основной уровень ($4s^2S$) и возбужденные уровни $4p^2P^{\circ}_{1/2}$, $4p^2P^{\circ}_{3/2}$, $5p^2P^{\circ}_{1/2}$ и $5p^2P^{\circ}_{3/2}$ перенаселены в слоях атмосферы выше $\log \tau = -0.5$. Характер поведения b -факторов в обоих случаях схожий, но можно отметить, что при учете столкновений с H I перенаселенность уровней $4s^2S$ и $5p^2P^{\circ}$ значительно слабее, что ведет к меньшим по абсолютной величине не-ЛТР поправкам.

Расчеты с моделью атома FS* (столкновения с H I рассчитаны Яковлевой и др. (2018) без учета

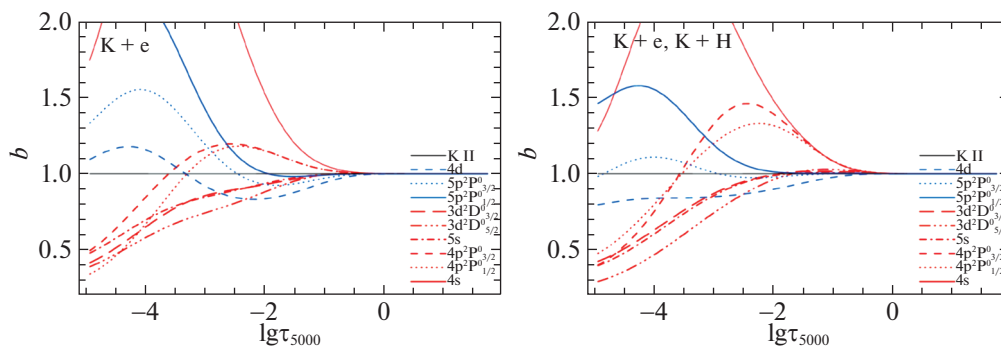


Рис. 1. b -Факторы избранных уровней атома К I в модели атмосферы Солнца, рассчитанные с учетом столкновений только с электронами (слева) и с включением столкновений с атомами H I (справа) из работы Яковлевой и др. (2019). Вертикальной линией отмечена глубина формирования линии 7698 Å.

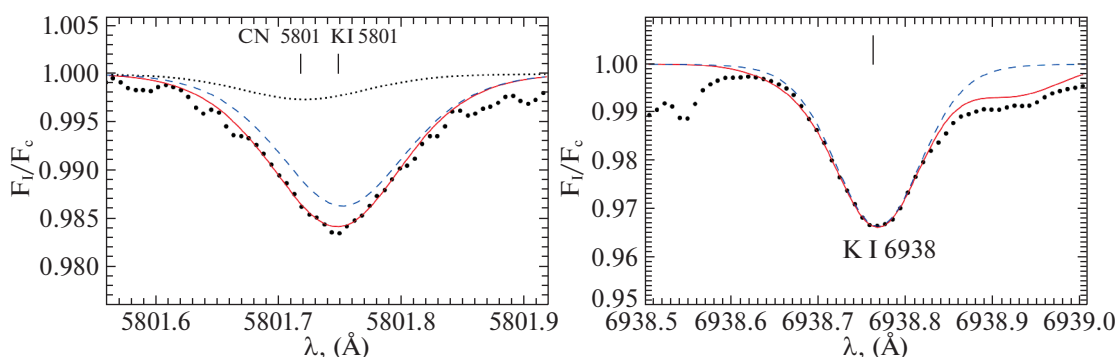


Рис. 2. Описание линий К I 5801 Å (слева) и 6938 Å (справа) в спектре Солнца (Куруц и др., 1984, черные точки) теоретическими не-ЛТР профилями в варианте FS (сплошная кривая). Полученное солнечное содержание приведено в табл. 1. Штриховой кривой показан профиль чистой линии К I. Для бленды 5801 Å также показан профиль линии молекулы CN (пунктирная кривая).

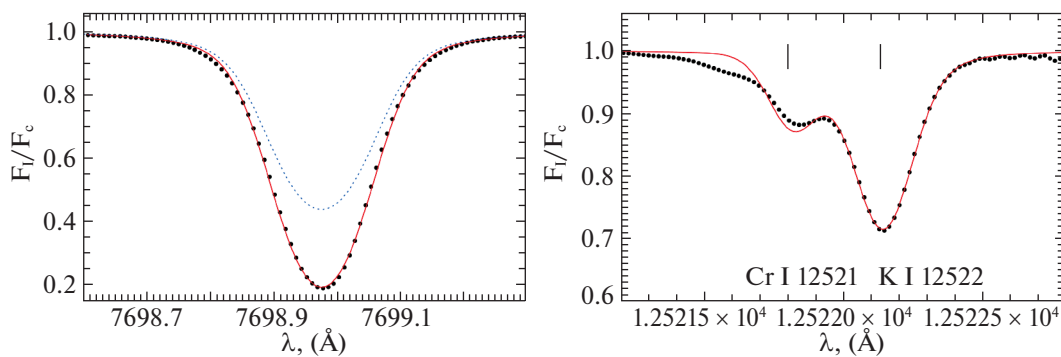


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для линий К I 7698 Å (слева) и 12522 Å (справа). Для линии 7698 Å пунктирной кривой для сравнения показан ЛТР-профиль при том же содержании калия.

тонкой структуры уровней) ведут к большей пере-заселенности нижних уровней, т.е. к более сильным не-ЛТР эффектам.

2.4. Модель атома Ca II

За основу мы берем модель атома Ca I-Ca II, разработанную нами ранее (Машонкина и др.,

2007, 2017). Для термов Ca II $3d^2D$, $4p^2P^o$ и $4d^2D$ модель атома учитывает дублетную структуру. В этой работе мы учитываем столкновения Ca II + H I, используя константы скоростей, рассчитанные Беляевым и др. (2019) с учетом тонкой структуры уровней Ca II.

Таблица 1. Атомные параметры изучаемых линий К I и содержание калия в солнечной атмосфере, полученное в разных моделях формирования линий

$\lambda, \text{Å}$	$E_{\text{exc}}, \text{эВ}$	Переход	$\log gf$	Ссылка	$\log \Gamma_6$	$\log \varepsilon_K$			
						ЛТР	FS	FS*	E
5801.75	1.617	$4p^2P_{3/2}^o - 7s^2S$	-1.63	C13	-	5.24	5.19	5.15	5.13
6938.76	1.617	$4p^2P_{3/2}^o - 6s^2S$	-1.15	C13	-	5.04	5.02	4.97	4.90
7698.97	0.000	$4s^2S - 4p^2P_{1/2}^o$	-0.18	T17	-7.445	5.39	5.00	4.96	4.95
12432.17	1.610	$4p^2P_{1/2}^o - 5s^2S$	-0.43	C13	-7.022	5.19	5.09	5.05	4.98
12522.13	1.617	$4p^2P_{3/2}^o - 5s^2S$	-0.13	C13	-7.021	5.32	5.15	5.06	5.01

Примечание. C13 — Сафронова и др. (2013), T17 — Трубка и др. (2017). Не-ЛТР содержание получено с моделями атомов FS, FS* и E.

3. АНАЛИЗ ЛИНИЙ К I В СПЕКТРЕ СОЛНЦА

Мы анализируем спектр Солнца (Куруц и др., 1984) и используем содержание, полученное по индивидуальным линиям, для определения дифференциального содержания у звезд. Все расчеты сделаны с моделью атмосферы 5780/4.44/0.00 и скоростью микротурбулентности $\xi_t = 0.9 \text{ км с}^{-1}$. Анализ проводится методом синтетического спектра путем подгонки теоретического профиля линии к наблюдаемому, а не методом воспроизведения эквивалентных ширин линий.

У звезд спектральных классов F–G–K нейтральный калий наблюдается в резонансном дублете К I 7664, 7698 Å и в субординатных, более слабых линиях в красной и инфракрасной (ИК) областях спектра, а также в линии 5801 Å. Линия К I 7664 Å блендирована теллурической линией молекулы O₂ и не используется для определения содержания. В табл. 1 представлены атомные параметры линий и полученное солнечное содержание в случае ЛТР и с разными вариантами модели атома при не-ЛТР. Константы ван-дер-ваальсовского уширения $\log \Gamma_6$ для линий 7698, 12432 и 12522 Å заимствованы из базы данных VALD (Рябчикова и др., 2015). Линии 5801 и 6938 Å слабые, и для них используется приближение Унзольда.

Для всех линий и для всех вариантов моделей атома не-ЛТР поправки отрицательные. На рис. 2 и 3 показаны примеры согласования наблюдаемых и теоретических профилей линий для Солнца. Как обсуждалось в подразделе 2.3, учет тонкой структуры при расчетах скоростей процессов столкновений с H I ведет к ослаблению не-ЛТР эффектов. Действительно, из табл. 1 видно, что для всех солнечных линий не-ЛТР поправки меньше

по абсолютной величине в случае FS, чем в случае FS*. Использование модели, включающей только столкновения с электронами (E), ведет к более отрицательным поправкам. Если не брать в расчет резонансную линию 7698 Å, можно сказать, что не-ЛТР расчеты ведут к уменьшению содержания в среднем на 0.1–0.2 dex.

Мы определили не-ЛТР содержание по пяти линиям как $\log \varepsilon_K = 5.09 \pm 0.08$ в случае FS, т.е. при учете тонкой структуры уровней в расчетах скоростей процессов столкновений с H I. Для модели атома FS* не-ЛТР содержание получается равным $\log \varepsilon_K = 5.04 \pm 0.08$. При ЛТР мы получили $\log \varepsilon_K = 5.23 \pm 0.13$. Точность среднего содержания определяется средне-квадратичной ошибкой $\sigma = \sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 / (n - 1)}$, где n — число линий. Метеоритное содержание, представленное в работе Лоддерс и др. (2009), составляет $\log \varepsilon_K = 5.10 \pm 0.02$. Таким образом, среднее содержание, полученное в предположении ЛТР, на 0.13 dex выше, чем метеоритное. Не-ЛТР расчеты ведут к лучшему согласию метеоритного и фотосферного содержания калия, и следует отметить, что содержание, полученное в варианте FS, согласуется с метеоритным наилучшим образом.

4. ВЛИЯНИЕ УЧЕТА ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ УРОВНЕЙ В РАСЧЕТАХ СТОЛКНОВЕНИЙ С H I НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ У ЗВЕЗД

4.1. Калий

Мы используем спектральные наблюдения трех звезд с дефицитом металлов (табл. 2), полученные в испано-германской обсерватории Калар-Альто (Испания) на 2.2-м телескопе с использованием эшелле-спектрографа FOCES. Для изуча-

Таблица 2. Параметры атмосфер избранных звезд и дифференциальное содержание $[K/H]$, полученное в разных моделях формирования линии 7698 Å

HD	T_{eff} , K	$\log g$	$[Fe/H]$	ξ_t	LTE	FS	FS*	E
59984	5930	4.02	-0.70	1.0	-0.31	-0.50	-0.51	-0.51
59374	5850	4.38	-0.89	1.0	-0.48	-0.55	-0.57	-0.58
134168	5890	4.02	-0.78	1.0	0.01	-0.22	-0.21	-0.23

емых звезд спектральное разрешение $R = \lambda/\delta\lambda \approx 40\,000$. Обработка спектров и удаление теллурических линий выполнены Хуавеем Жангом.

Параметры атмосфер заимствованы из работы Ситновой и др. (2015). Эффективные температуры и ускорение силы тяжести были определены с использованием нескольких методов, в частности, метод ИК-потоков, с привлечением тригонометрических параллаксов и путем спектроскопического не-ЛТР анализа линий Fe I и Fe II.

Мы определили содержание калия в звездах по линии 7698 Å в предположении ЛТР, а также в не-ЛТР для нескольких атомных моделей: FS, FS* и E. Применяется дифференциальный подход, т.е. из содержания, полученного по индивидуальной линии у данной звезды, вычитается соответствующее солнечное содержание. Используется стандартное обозначение $[K/H] = \log N_K/N_H - \log N_K/N_{H\odot}$. Как и для солнечных линий, анализ проводился методом синтетического спектра. На рис. 4 показаны примеры теоретического описания наблюдаемых спектров избранных звезд. Полученное содержание приведено в табл. 2.

Не-ЛТР расчеты ведут к снижению $[K/H]$ по сравнению с ЛТР при всех вариантах атомных моделей. Это значит, что в атмосферах исследуемых звезд не-ЛТР эффекты для K I больше, чем для Солнца. Разность между дифференциальным содержанием калия в не-ЛТР и ЛТР всегда отрицательна и лежит в интервале от 0.07 dex до 0.22 dex.

Из табл. 2 видно, что дифференциальное содержание в вариантах FS и FS* различается не более чем на 0.02 dex, откуда можно сделать вывод, что учет тонкой структуры в расчетах столкновений с H I слабо влияет на определения дифференциального содержания калия в звездах. Можно заметить, что все три варианта — FS, FS* и E дают близкие значения $[K/H]$. Также мы провели не-ЛТР расчеты с несколькими дополнительными тестовыми моделями:

1) E–N — тонкая структура не учтена нигде в модели атома, включены только столкновения с электронами,

2) N — то же, что E–N, но добавлены столкновения с атомами водорода с константами скоростей из работы Яковлевой и др. (2018).

Для этих вариантов мы определили не-ЛТР содержание по резонансной линии калия у Солнца и звезд и получили, что дифференциальное содержание, полученное в вариантах N и E–N, согласуется в пределах 0.01 dex. В обоих случаях $[K/H]$ оказалось более высоким, чем в вариантах FS, FS* и E. Сравнивая $[K/H]$, полученное в вариантах E и E–N, можно сделать вывод о том, что учет тонкой структуры уровней в модели атома приводит к более сильным не-ЛТР эффектам, чем в случае более простой модели атома.

4.2. Линии ИК-триплета Ca II у звезд с ультра-дефицитом металлов

В том диапазоне звездных параметров, где важно учитывать влияние столкновений с H I на статистическое равновесие атомов, Ca II — доминирующая стадия ионизации кальция. Но благодаря тому, что нижний уровень триплета Ca II 8498, 8542, 8668 Å является метастабильным, линии подвержены отклонениям от ЛТР, особенно у звезд с ультра-дефицитом металлов (UMP, $[Fe/H] < -4$), где поглощение в линии определяется, в основном, ее ядром, а вклад крыльев мал. Это связано с переселенностью уровня $3d^2D$ в верхних слоях атмосферы, где формируются ядра триплетных линий Ca II, вследствие цепочки процессов: радиативная накачка уровня $4d^2P$ из основного состояния и выход фотонов в спонтанных переходах $4d^2P - 3d^2D$. Отклонения от ЛТР ведут к усилению линий ИК-триплета Ca II и отрицательным поправкам к содержанию. Например, Машонкина и др. (2007) рассчитали $\Delta_{\text{NLTE}} = -0.27$ dex для Ca II 8498 Å в модели атмосферы 4750/1.5/–3 и –0.55 dex в модели 4750/1.5/–4.

Мы сделали не-ЛТР расчеты с двумя моделями атмосфер 5811/4.0/–4.5 и 5100/2.2/–4.5, которые представляют атмосферы типичных карлика и гиганта с ультра-дефицитом металлов, для двух

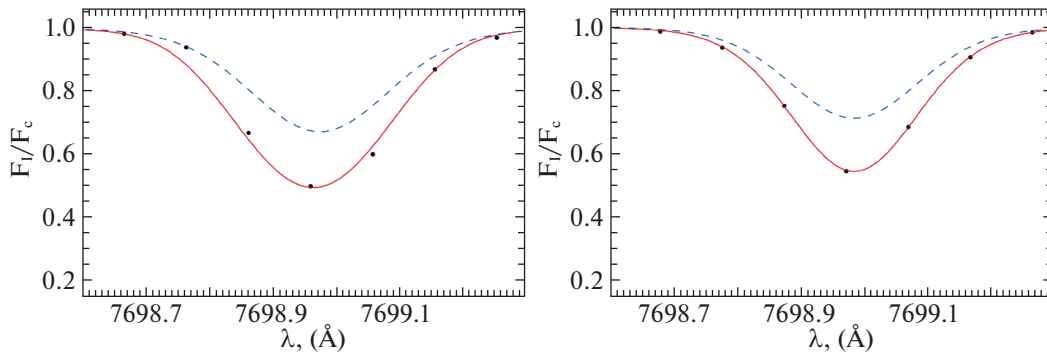


Рис. 4. Линия 7698 Å для HD 134169 (слева) и HD 59984 (справа). Наблюдаемый спектр — черные кружки, синтетический профиль в не-ЛТР — сплошная кривая, в ЛТР при том же содержании — штриховая кривая.

вариантов модели атома Ca I—Ca II. Для Ca I весь набор атомных данных сохранялся неизменным в том виде, как описан Ситновой и др. (2019), а изменения касались только Ca II. Модель атома, которая включает столкновения Ca II + H I с константами скоростей, рассчитанными с учетом тонкой структуры уровней Ca II (Беляев и др., 2019), назовем Ca-FS. Модель атома, в которой скорости процессов столкновений Ca II + H I предполагаются одинаковыми для линий одного мультиплета и берутся из расчетов Беляева и др. (2018), назовем Ca-FS*. Не-ЛТР поправки, рассчитанные для резонансной линии Ca II 3933 Å и линий ИК триплета, приведены в табл. 3.

В модели атмосферы карлика не-ЛТР эффекты есть даже у резонансной линии Ca II, с одинаковой $\Delta_{\text{NLTE}} = -0.09$ dex в вариантах Ca-FS и Ca-FS*. Для ИК-линий отклонения от ЛТР намного сильнее в атмосфере гиганта, чем карлика, но изменение не-ЛТР поправки при переходе от модели атома Ca-FS к Ca-FS* одинаково мало и у гиганта, и у карлика в случае линий Ca II 8498 и 8542 Å. Линия Ca II 8662 Å наиболее чувствительна к изменению скоростей столкновений Ca II + H I. Как и в случае K I, отклонения от ЛТР уменьшаются при использовании коэффициентов скоростей, рассчитанных с учетом тонкой структуры уровней.

5. СРАВНЕНИЕ С ПРЕДЫДУЩИМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ K I

Жанг и др. (2006) использовали дравиновские скорости и другие значения $\log gf$. Для определения не-ЛТР содержания калия они применяли метод синтетического спектра и для шести солнечных линий получили среднее значение $\log \epsilon_{\text{K}} = 5.11$, что находится в хорошем согласии с нашими результатами, несмотря на различие подходов. Для линии K I 7698 Å разница с Жанг и др.

(2006) составляет 0.10 dex. Для остальных линий поправки согласуются в пределах 0.05 dex.

В работе Реггиани и др. (2019) не-ЛТР содержание калия определялось по трем солнечным линиям 5801, 6938 и 7698 Å с применением данных Яковлевой и др. (2018). Они определили среднее содержание как $\log \epsilon_{\text{K}} = 5.11$. Их анализ основан на методе воспроизведения эквивалентных ширин. Применяя этот метод, для линии 6938 Å мы получили не-ЛТР поправку, отличающуюся на 0.01 dex от Реггиани и др. (2019). Для линии 5801 Å поправки различаются на 0.04 dex. Линия 5801 Å слабая, и ее эквивалентная ширина зависит от того, как был установлен уровень континуума для наблюдаемого спектра. Она блендирована линией молекулы CN (рис. 2), и мы не знаем, как это учитывалось в работе Реггиани и др. (2019), а также, какой уровень непрерывного спектра был выбран. Для резонансной линии 7698 Å разница с Реггиани и др. (2019) составляет 0.07 dex.

Для сравнения с Реггиани и др. (2019) мы определили содержание калия в атмосфере звезды HD 84937 ($T_{\text{eff}}/\log g/[\text{Fe}/\text{H}] = 6350/4.09/-2.15$) по линии 7698 Å. Параметры атмосферы не идентичны тем, которые использовали Реггиани и др. (2019), но близки к ним. Не-ЛТР поправка, представленная в работе Реггиани и др. (2019), составляет $\Delta_{\text{NLTE}} = -0.18$ dex, мы получили $\Delta_{\text{NLTE}} = -0.19$ dex (вариант FS). Таким образом, результаты хорошо согласуются.

Также мы рассчитали не-ЛТР поправки для линии K I 7698 Å в трех моделях атмосфер с общими $T_{\text{eff}} = 5500$ K и $\log g = 4.0$, но разным содержанием металлов — $[\text{Fe}/\text{H}] = 0, -1$ и -2 : $\Delta_{\text{NLTE}} = -0.41, -0.44$ и -0.21 dex соответственно. Для металличностей -2 и -1 поправки согласуются с Реггиани и др. (2019) в пределах 0.03 dex. Но при $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ наша поправка на 0.16 dex больше по абсолютной

Таблица 3. Не-ЛТР поправки (*dex*) для линий Ca II, рассчитанные для разных вариантов модели атома

$\lambda, \text{\AA}$	$E_{\text{exc}}, \text{эВ}$	5810/4.0/−4.5			5100/2.2/−4.5		
		$EW(\text{м\AA})$	Ca-FS	Ca-FS*	$EW(\text{м\AA})$	Ca-FS	Ca-FS*
3933.66	0.00	218	−0.09	−0.09	1004	0.0	0.0
8498.02	1.69	22	−0.10	−0.09	173	−0.65	−0.64
8542.09	1.70	293	−0.22	−0.23	277	−0.60	−0.61
8662.14	1.69	266	−0.12	−0.16	257	−0.59	−0.68

величине. Как обсуждалось выше, для солнечной линии 7698 Å мы также получили более сильные отклонения от ЛТР, чем в работе Реггиани и др. (2019).

6. ВЫВОДЫ

Построена новая модель атома К I с использованием современных атомных данных (модель FS), в том числе констант скоростей процессов столкновений К I + Н I, рассчитанных Яковлевой и др. (2019) с учетом тонкого расщепления уровней К I. Модифицирована модель атома Ca I—Ca II путем введения констант скоростей столкновений Ca II + Н I, рассчитанных Беляевым и др. (2019) с учетом тонкого расщепления уровней Ca II (модель Ca-FS). Проведены не-ЛТР расчеты для К I и Ca I—Ca II с использованием разных вариантов моделей атомов, которые отличаются способом учета неупругих процессов при столкновениях с атомами водорода.

В согласии с не-ЛТР исследованиями, имеющимися в литературе, К I подвержен сверхрекомбинации, что ведет к усилению спектральных линий и отрицательным поправкам к содержанию. Показано, что использование новых данных для столкновений К I + Н I из работы Яковлевой и др. (2019) ведет к ослаблению не-ЛТР эффектов по сравнению с вариантом, в котором скорости столкновений с Н I одинаковы для переходов одного мультиплета.

Солнечное не-ЛТР содержание $\log \varepsilon_{\text{K}} = 5.09 \pm 0.08$ (FS), полученное по пяти линиям, согласуется с метеоритным в пределах 0.01 dex. Для модели атома FS* солнечное содержание меньше на 0.05 dex. Профиль резонансной линии К I 7698 Å в солнечном спектре невозможно воспроизвести в рамках ЛТР, а содержание, полученное по эквивалентной ширине, больше на 0.39 dex, чем не-ЛТР содержание. Для субординатных линий не-ЛТР поправки малы, и наши результаты находятся в хорошем согласии с работой Реггиани и др. (2019), но для резонансной линии мы получили поправку на 0.07 dex больше по абсолютной величине.

Для трех звезд-карликов с умеренным дефицитом металлов, для которых есть надежные определения параметров атмосферы и качественные спектральные наблюдения, содержание калия определено по резонансной линии К I в разных моделях ее формирования. Показано, что включение новых точных данных о столкновениях с Н I в модель атома практически не влияет на дифференциальное содержание калия [K/H], но ведет к увеличению абсолютного содержания, в среднем, на 0.05 dex по сравнению со случаем, когда берутся одинаковые скорости столкновений с Н I для переходов одного мультиплета. Абсолютное содержание необходимо, например, при изучении зависимости содержания элементов от температуры их конденсации, что важно для уточнения различий в химическом составе звезд с планетами и без планет.

Показано, что учет тонкой структуры уровней Ca II в расчетах столкновений с Н I (Беляев и др., 2019) ведет к ослаблению отклонений от ЛТР для линии Ca II 8662 Å в моделях атмосфер с [Fe/H] = −4.5 по сравнению со случаем, когда тонкое расщепление не учитывалось (Беляев и др., 2018). Но эффект очень мал для двух других линий триплета — Ca II 8498, 8542 Å.

Авторы благодарят Х. Жанга за предоставление наблюдаемых спектров звезд, О. Зацаринного за данные по сечениям фотоионизации К I, Х. Реггиани за константы скоростей возбуждения переходов К I при столкновениях с атомами Н I в модели Б. Каулакиса, М.Д. Неретина благодарна Фонду развития теоретической физики и математики “БАЗИС” за частичную поддержку исследования. С.А. Яковлева и А.К. Беляев благодарят Министерство просвещения России за финансовую поддержку в рамках государственного задания (проект № FSZN-2020-0026). М.Н., Л.М. и Т.С. благодарят Министерство науки и высшего образования РФ (грант 13.1902.21.0039) за финансовую поддержку этого исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский и др. (S.M. Andrievsky, M. Spite, S.A. Korotin, F. Spite, P. Bonifacio, R. Cayrel,

- P. Francois, and V. Hill), *Astron. Astrophys.* **509**, A88 (2010).
2. Барклем и др. (P.S. Barklem, A.K. Belyaev, M. Guitou, N. Feautrier, F.X. Gadéa, A. Spielfiedel), *Astron. Astrophys.* **530**, A94 (2011).
 3. Батлер и Гиддингс (K. Butler and J. Giddings), *Newsletter on Analysis of Astronomical Spectra* 9, Univ. London. **723** (1985).
 4. Беляев и др. (A.K. Belyaev, Y.V. Voronov, and F.X. Gadéa), *ApJ*. **867**, 87 (2018)
 5. Беляев и др. (A.K. Belyaev, Ya.V. Voronov, and S.A. Yakovleva), *Phys. Rev.* **A100**, 062710 (2019).
 6. Брулс и др. (J.H.M.J. Bruls, R.J. Rutten, and N.G. Shchukina), *Astron. Astrophys.* **265**, 237 (1992).
 7. Густафссон и др. (B. Gustafsson, B. Edvardsson, K. Eriksson, U.G. Jorgensen, A. Nordlund, and B. Plez), *Astron. Astrophys.* **486**, 951 (2008).
 8. Дравин (H.-W. Drawin), *Zeitschrift für Physik* **211**, 404 (1968).
 9. Жанг и др. (H.W. Zhang, K. Butler, T. Gehren, J.R. Shi, and G. Zhao), *Astron. Astrophys.* **453**, 723 (2006).
 10. Жао и др. (G. Zhao, L. Mashonkina, H.L. Yan, S. Alexeeva, C. Kobayashi, Y. Pakhomov, J.-R. Shi, T. Sitnova, K. Tan, H.-W. Zhang, J.B. Zhang, Z.M. Zhou, M. Bolte, Y. Q. Chen, X. Li, F. Liu, M. Zhai), *Astrophys. J.* **833**, 225 (2016).
 11. Зацаринный, Тайял (O. Zatsarinny and S.S. Tayal), *Phys. Rev. A* **81**, 043423 (2010).
 12. Иванова, Шиманский (D. Ivanova and V. Shimanskii), *Astron. Rep.* **44**, 376 (2000).
 13. Каулакис (B. Kaulakys), *J. Phys. B At. Mol. Phys.* **24**, L127 (1991).
 14. Крамида и др. (A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, and NIST ASD Team), *NIST Atomic Spectra Database (version 5.7.1)* (2019).
 15. Курucz и др. (R.L. Kurucz, I. Furenlid, J. Brault, and L. Testerman), *Solar Flux Atlas from 296 to 1300 nm Nat. Solar Obs., Sunspot, New Mexico* (1984).
 16. Лоддерс и др. (K. Lodders, H. Plame, and H.-P. Gail), *Landolt-Börnstein — Group VI Astronomy and Astrophysics Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology Volume 4B: Solar System*. Edited by J.E. Trümper, 4.4 (2009).
 17. Машонкина и др. (L. Mashonkina, T. Gehren, J.-R. Shi, et al.), *Astron. Astrophys.* **528**, A87 (2011).
 18. Машонкина и др. (L. Mashonkina, A.J. Korn, and N. Przybilla), *Astron. Astrophys.* **461**, 261 (2007).
 19. Машонкина и др. (L. Mashonkina, T. Sitnova, and A.K. Belyaev), *Astron. Astrophys.* **605**, A53 (2017).
 20. Муциарелли и др. (A. Mucciarelli, T. Merle, and M. Bellazzini), *Astron. Astrophys.* **600**, A104 (2017).
 21. Перриман и др. (M.A.C. Perryman, K.S. de Boer, G. Gilmore, E. Høg, M.G. Lattanzi, L. Lindegren, X. Luri, F. Mignard, O. Pace, and P.T. de Zeeuw), *Astron. Astrophys.* **369**, 339 (2001).
 22. Прантцос и др. (N. Prantzos, C. Abia, and M. Limongi, A. Chieffi, and S. Cristallo), *MNRAS* **476**, 3432 (2018).
 23. Реггиани и др. (H. Reggiani, A.M. Amarsi, K. Lind, P.S. Barklem, O. Zatsarinny, K. Bartschat, D.V. Fursa, I. Bray, L. Spina, and J. Meléndez), *Astron. Astrophys.* **627**, A177 (2019).
 24. ван Регемортер (H. van Regemorter), *Astrophys. J.* **136**, 906 (1962).
 25. Рябчикова и др. (T. Ryabchikova, N. Piskunov, R.L. Kurucz, H.C. Stempels, U. Heiter, Y. Pakhomov, and P.S. Barklem), *Physica Scr.* **90**, 054005 (2015).
 26. Сафронова и др. (M.S. Safronova, U.I. Safronova, and C.W. Clark), *Phys. Rev. A* **87**, 052504 (2013).
 27. Ситнова и др. (T. Sitnova, G. Zhao, L. Mashonkina, Y.Q. Chen, F. Liu, Yu. Pakhomov, K. Tan, M. Bolte, S. Alexeeva, F. Grupp, J.R. Shi, H.W. Zhang), *Astrophys. J.* **808**, 148 (2015).
 28. Ситнова и др. (T. Sitnova, L. Mashonkina, R. Ezzeddine, and A. Frebel), *MNRAS* **485**, 3527 (2019).
 29. Стинбок и Холвергер (W. Steenbock and H. Holweger), *Astron. Astrophys.* **130**, 319 (1984).
 30. Такеда и др. (Y. Takeda, K.-I. Kato, Y. Watanabe, and K. Sadakane), *Publ. Astron. Soc. Japan* **48**, 511 (1996).
 31. Трубка и др. (R. Trubko, M.D. Gregoire, W.F. Holmgren, and A.D. Cronin), *Phys. Rev. A* **95**, 052507 (2017).
 32. Цымбал и др. (V. Tsymbal, T. Ryabchikova, and T. Sitnova), *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **518**, 247 (2019).
 33. Штаркенбург и др. (E. Starkenburg, V. Hill, E. Tolstoy, J.I. González Hernández, M. Irwin, A. Helmi, G. Battaglia, P. Jablonka, M. Tafelmeyer, M. Shetrone, K. Venn, and T. de Boer), *Astron. Astrophys.* **513**, A34 (2010).
 34. Штейнмец и др. (M. Steinmetz, T. Zwitter, A. Siebert, F.G. Watson, K.C. Freeman, U. Munari, R. Campbell, M. Williams, et al.), *Astron. J.* **132**, 1645 (2006).
 35. Щукина Н.Г., *Кинематика и физика небесных тел* **3**, 40 (1987).
 36. Яковлева и др. (S.A. Yakovleva, P.S. Barklem, and A.K. Belyaev), *MNRAS* **473**, 3810 (2018).
 37. Яковлева и др. (S.A. Yakovleva, Ya.V. Voronov, and A.K. Belyaev), *Optics and Spectroscopy* **127**, 207 (2019).