

УДК 524.316-36; 524.6-36

## ВЛИЯНИЕ АТОМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АЛЮМИНИЯ В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

© 2014 В. С. Менжевицкий<sup>1\*</sup>, Н. Н. Шиманская<sup>1</sup>, В. В. Шиманский<sup>1</sup>, Д. О. Кудрявцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 13 января 2014 года; принята в печать 28 февраля 2014 года

В работе изучено влияние величин сечений фотоионизации Al I с основного уровня на результаты определения содержания алюминия в атмосферах звезд. Проведено согласование теоретических и наблюдаемых профилей линий резонансного  $\lambda\lambda 3944.01, 3961.52 \text{ \AA}$  и субординатного  $\lambda\lambda 6696.03, 6698.68 \text{ \AA}$  дублетов в спектрах высокого разрешения звезд солнечного типа пониженной металличности HD 22879 и HD 201889. Выполнено определение параметров звезд по их фотометрическим и спектроскопическим данным. В результате расчетов показано, что согласование профилей, а также получение единого содержания алюминия одновременно по обеим группам линий возможно только при использовании низких сечений фотоионизации (примерно 10–12 Mb). При применении больших сечений (примерно 58–65 Mb) такое согласование невозможно. В итоге сделан вывод о предпочтительности использования низких сечений фотоионизации при определении содержания алюминия в атмосферах звезд малой металличности. В работе проведено переопределение содержания алюминия в атмосферах звезд гало. Полученные содержания уменьшаются на 0.1–0.15 dex относительно определенных нами ранее, что не влияет на сделанные на их основе выводы. В частности, не-ЛТР распределение [Al/Fe]–[Fe/H] в целом имеет лишь качественное согласие с данными теоретических прогнозов. Поэтому остается актуальным дальнейшее уточнение теории ядерного синтеза алюминия в процессе химической эволюции Галактики.

Ключевые слова: *звёзды: химический состав—атомные данные—звёзды: атмосферы—линии: профили—Галактика: гало—Галактика: эволюция—звёзды: индивидуальные: HD 22879, HD 201889*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Определение химического состава звезд является одним из важнейших этапов при построении теорий химической эволюции Галактики. Довольно часто, особенно при исследовании большого количества элементов, анализ химического состава проводится без учета отклонений от ЛТР. Однако в современных расчетах содержаний некоторых химических элементов значительные не-ЛТР поправки (до 1 dex) получены даже для звезд поздних спектральных классов.

Проведенные к настоящему времени анализы отклонений от ЛТР в атмосферах A–K звезд для отдельных элементов показывают, что их характер и величина в значительной степени зависит от величины сечения фотоионизации с основного состояния. Например, атомы KI и NaI, у которых значения пороговых сечений фотоионизации

малы ( $\sigma = 0.012 \text{ Mb}$  и  $\sigma = 0.14 \text{ Mb}$  [1] соответственно), практически не испытывают в звездной атмосфере ионизацию ультрафиолетовым излучением и оказываются в состоянии «сверхрекомбинации» [2, 3] с большим перезаселением основного уровня. Причиной возникновения «сверхрекомбинации» этих атомов является сочетание процессов рекомбинации на высоковозбужденные уровни и цепочек последующих спонтанных переходов. Атомы Si I со значительными пороговыми сечениями ( $\sigma = 32 \text{ Mb}$  [1]), наоборот, интенсивно ионизируются ультрафиолетовым потоком и переходят в состояние «сверхионизации» [4] с недонаселенностью основного уровня.

У атома Al I значение порогового сечения фотоионизации велико (по данным разных авторов от 10 до 65 Mb), и, следовательно, для него вероятны большие отклонения от ЛТР, обусловленные «сверхионизацией», приводящие к ослаблению оптических линий.

\*E-mail: vt@kpfu.ru

Проведенные расчеты равновесных состояний Al I (Герен и др. [5], Баумюллер и Герен [6, 7]) показали, что отклонения от ЛТР незначительны для звезд солнечной металличности. Однако во всех металлически бедных F–G звездах с  $-3.0 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.0$  не-ЛТР поправки содержаний, определяемых по резонансным линиям  $\lambda\lambda 3944.01, 3961.52 \text{ \AA}$  и превышают  $\Delta[\text{Al}/\text{H}] = 0.3 \text{ dex}$  и должны учитываться при любых исследованиях химического состава.

Нами [8] был проведен теоретический анализ формирования линий алюминия в атмосферах звезд поздних спектральных классов. Для девяти отобранных линий Al I были рассчитаны наборы теоретических не-ЛТР поправок к содержаниям Al, определенным в предположении ЛТР, ( $\Delta X_{\text{NLTE}} = \log \epsilon_{\text{NLTE}} - \log \epsilon_{\text{LTE}}$ ) для сеток моделей атмосфер в широком диапазоне параметров. В результате анализа мы пришли к выводам, что не-ЛТР поправки к содержанию Al несут существенны для звезд спектральных классов F–K нормальной металличности и слабо зависят от  $\log g$ , но резко возрастают с ростом температуры ( $T_{\text{eff}} > 6000 \text{ K}$ ) и уменьшением металличности (что в целом совпадает с выводами Баумюллера и Герена [6, 7]).

## 2. ВЫБОР ПОРОГОВОГО СЕЧЕНИЯ ИОНИЗАЦИИ

Корректный учет ионизации ультрафиолетовым излучением с основного уровня  $3p$  имеет большое значение при не-ЛТР расчетах для Al I, так как именно сечение данного процесса определяет величину отклонений от ЛТР. В литературе приводятся несколько существенно отличных величин порогового сечения фотоионизации с основного уровня атома Al I. Сравнение данных разных авторов было проведено нами ранее (см. рис. 1 в работе [8]). Их анализ показывает, что значения пороговых сечений по данным работ Хофсаеса [9], Яковлева и др. [10] (10–12 Mb) оказываются в 5–6 раз меньше, чем по данным TOPbase [1] (57.2 Mb), что, безусловно, должно сказываться на величинах не-ЛТР поправок.

При проведении расчетов не-ЛТР поправок [8] и определении содержания алюминия для выборки из 160 звезд диска и гало Галактики [11] сечения фотоионизации со всех уровней Al I были приняты согласно данным TOPbase [1]. Такой набор атомных параметров был обусловлен близостью величины сечения фотоионизации с основного уровня атома Al I, полученной в [1] ( $\sigma = 57.2 \text{ Mb}$ ), к результатам прямых измерений [13] ( $\sigma = 65 \pm 7 \text{ Mb}$ ). Близкое значение ( $\sigma = 49 \text{ Mb}$ ) получено также Батлером [12], результаты которого использовали при моделировании Баумюллер и Герен [6, 7].

До экспериментальных измерений сечения ионизации с основного уровня атома Al I теоретические расчеты этого сечения фотоионизации методом квантовых дефектов давали оценку на уровне  $\sigma = 20\text{--}30 \text{ Mb}$  (см. соответствующие ссылки в работе [13]). Поэтому для анализа влияния принятых значений  $\sigma$  на величину не-ЛТР отклонений нами были выполнены специальные тестовые расчеты с использованием альтернативного набора сечений из работы [9].

Анализ спектра Солнца показал, что применение различных сечений ионизации практически не влияет на результат определения солнечного содержания алюминия и на значения эмпирических атомных констант линий Al I [8]. Однако для звезд с металличностью  $-4 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$  использование низких сечений ионизации из работы [9] приводит к уменьшению амплитуды не-ЛТР поправок содержания Al на 0.1–0.4 dex. Максимальные изменения достигаются для звезд с температурами  $T_{\text{eff}} = 5500\text{--}6500 \text{ K}$  и металличностью  $[\text{Fe}/\text{H}]$  от  $-1$  до  $-2$ . Поэтому нами предложен метод экспериментального определения сечения ионизации с основного состояния Al I на основе совместного исследования профилей его резонансных и субординатных линий в спектрах звезд с данными параметрами [8]. При этом предпочтительным является исследование звезд с  $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$ , в спектрах которых обе группы линий (как резонансные, так и субординатные) наименее искажены шумами наблюдений и блендированием.

## 3. НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

Спектроскопические наблюдения звезд HD 201889 и HD 22879 выполнены, в ночи 22/23.05.2013 и 9/10.10.2013 в фокусе Несмит-2 6-м телескопа БТА САО РАН на эшелле-спектрометре НЭС [14], оснащенный ПЗС-матрицей E2V CCD 42-90 размером  $2048 \times 4608$  пикселей, охлаждаемой жидким азотом. Для обоих объектов получены серии последовательных спектрограмм (9 и 11 соответственно) высокого разрешения ( $R = 43000$ ) в рабочем диапазоне  $\lambda\lambda 3850\text{--}6800 \text{ \AA}$ . Их первичная обработка проведена по стандартной методике с применением пакета редукции спектральных наблюдений REDUCE [15].

Сложение спектрограмм позволило получить итоговые спектры со средним отношением сигнал/шум  $S/N = 145$  для HD 201889 и  $S/N = 105$  для HD 22879. Для повышения значения  $S/N$  спектры были дополнительно сглажены по пяти

**Таблица 1.** Параметры звезд HD 22879 и HD 201889. Цифрами I и II отмечены, соответственно, результаты нашей работы и усредненные данные предыдущих исследований. В скобках указано число использованных оценок

Параметр	HD 22879		HD 201889	
	I	II (11)	I	II (24)
$\pi$ , mas	39.2		18.6	
$M/M_{\odot}$	0.72		0.76	
$R/R_{\odot}$	1.04		1.22	
$T_{\text{eff}}$ , K	$5860 \pm 80$	$5840 \pm 50$	$5740 \pm 10$	$5620 \pm 50$
$\log g$ , dex	$4.22 \pm 0.06$	$4.26 \pm 0.15$	$4.11 \pm 0.05$	$4.06 \pm 0.13$
[Fe/H], dex	$-0.92 \pm 0.09$	$-0.85 \pm 0.07$	$-0.92 \pm 0.09$	$-0.88 \pm 0.13$
$\xi_{\text{turb}}$ , км с <sup>-1</sup>	$1.0 \pm 0.2$		$1.2 \pm 0.3$	

точкам методом бегущего среднего. Их окончательная нормировка выполнялась в пакете обработки графической информации Origin путем сравнения с теоретическими спектрами, рассчитанными комплексом STAR (см. ниже). При анализе спектров нами исследовались линии резонансного дублета AlI  $\lambda\lambda 3944.01, 3961.52 \text{ \AA}$  и дублета субординатных линий  $\lambda\lambda 6696.03, 6698.68 \text{ \AA}$ . Существенное блендирование всех линий потребовало выполнить их анализ с применением методики моделирования синтетических спектров с учетом отклонений от ЛТР.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕР

Для достижения однородности с представленными ранее результатами [11] нами были переопределены основные параметры изучаемых объектов. Эффективные температуры звезд HD 22879 и HD 201889 определялись с использованием значений их показателей цвета  $V - J$ ,  $V - H$  и  $V - K$ , рассчитанных на основе данных из каталогов [16] и [17], и теоретических калибровок Куруца [18]. Итоговое значение  $T_{\text{eff}}$  рассчитано усреднением данных, полученных по всем показателям. Величины поверхностной силы тяжести  $\log g$  найдены с учетом оценок астрометрических параллаксов звезд из [19], их блеска в полосе  $V$  [16] и эволюционных треков [20]. Индекс металличности звезд [Fe/H] и скорость микротурбулентности в их атмосферах  $\xi_{\text{turb}}$  установлены по стандартной методике анализа эквивалентных ширин  $W_{\lambda}$  линий Fe II. Для этого в наблюдаемых спектрах звезд нами измерены значения  $W_{\lambda}$  23 линий с силами осцилляторов  $gf$ , откалиброванными ранее при исследовании потокового атласа Солнца [21]. Полученные параметры атмосфер HD 22879 и HD 201889 сравнены с усредненными результатами более ранних работ в

таблице 1. Наши оценки  $\log g$  и [Fe/H] для обеих звезд и  $T_{\text{eff}}$  для HD 22879 в пределах возможных ошибок совпадают с литературными. Одновременно с этим определенное нами значение эффективной температуры HD 201889 ( $T_{\text{eff}} = 5740 \pm 10 \text{ K}$ ) в среднем на 120 K превышает данные других исследований. Выполненное моделирование спектров звезды при  $T_{\text{eff}} = 5740 \text{ K}$  и  $T_{\text{eff}} = 5620 \text{ K}$  показало, что соответствующие вариации в не-ЛТР содержаниях алюминия составляют до 0.11 dex. Однако основной вывод нашей работы о предпочтительности применения низких сечений ионизации при не-ЛТР описании спектра AlI (см. ниже) сохраняется при обеих оценках  $T_{\text{eff}}$ .

#### 5. МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИНТЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Сильное блендирование резонансных линий AlI обуславливает необходимость вычислений синтетических бланкетированных спектров звезд с прямым учетом отклонений от ЛТР для избранных атомов. Поэтому мы адаптировали программный комплекс SPECTR [22] для расчета спектров одиночных звезд с заданными параметрами ( $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ , [Fe/H]) и химическим составом атмосфер. Модели атмосфер для этих параметров получены в результате интерполяции сетки моделей Кастелли и Куруца [23] по методике, изложенной в [24].

Моделирование синтетических спектров проводилось с учетом источников непрерывного поглощения из комплексов STARDISK [25] и SPECTR [26], около 600 000 атомарных и более 1 800 000 молекулярных линий  $^{12}\text{CH}$ ,  $^{13}\text{CH}$ , SiH из списков Куруца [18], Кастелли и Куруца [23] и 28 молекулярных полос 13 молекул, рассчитанных Я. Павленко согласно теории Нерсисян и др. [27]. Для 1350 сильных оптических линий в диапазоне  $\lambda = 3900\text{--}7000 \text{ \AA}$  использованы

эмпирические силы осцилляторов, полученные Шиманской и др. [28]. Расчет профилей линий  $\text{H I}$ ,  $\text{He I}$  проводился на основе теорий уширения Вайдела–Куппера–Смита [29] и Грима [30]. Для линий тяжелых элементов задавался фойгтовский профиль с уширением за счет теплового движения атомов и микротурбулентности с заданной скоростью  $\xi_{\text{turb}}$ , естественного затухания, штарковского уширения согласно аппроксимации Куруца и Фюрнлида [31] и ван-дер-ваальсовского уширения с оценками констант  $C_6$ , определенными по формуле Грея [32] с масштабирующим фактором в диапазоне  $\Delta \log C_6 = 0.7\text{--}1.2$  [28]. Для исследуемых линий  $\text{Al I}$  и наиболее важных резонансных линий  $\text{Ca II}$  константы  $C_6$  приняты в соответствии с данными работ [8, 33]. Не-ЛТР профили линий избранных атомов моделировались с учетом населенностей их уровней, предварительно рассчитываемых по стандартной не-ЛТР методике комплексом NONLTE3. Одновременно с  $\text{Al I}$  учет отклонений от ЛТР выполнен нами для линий  $\text{Ca II}$  (43-уровневая модель [33]),  $\text{H I}$  (23-уровневая модель [34]),  $\text{Mg I}$  (50-уровневая модель [35]) и  $\text{Mg II}$  (45-уровневая модель [36]). В расчетах использована солнечная шкала содержаний химических элементов согласно данным Гревесса и Сейвела [37], масштабируемая пропорционально металличности звезд. Содержания некоторых элементов варьировались для оптимального согласования теоретических и наблюдаемых спектров.

Уравнение переноса в каждой частоте решалось методом Эрмитта с определением удельных интенсивностей излучения для фиксированных углов  $\theta'$ . С целью последующей нормировки решение находилось в вариантах с включением поглощения в линиях и молекулярных полосах и без него. Ненормированный спектр звезды рассчитывался путем интегрирования удельных интенсивностей всех площадок разбиения поверхности с учетом их площади, условий видимости под углом  $\theta$  и лучевых скоростей, обусловленных вращением и микротурбулентностью. Интенсивность излучения, выходящего к наблюдателю под углом  $\theta$  определялась путем кубической интерполяции удельных интенсивностей в углах  $\theta'$ . Далее спектр сворачивался с аппаратной функцией спектрометра, задаваемой гауссианой с полушириной, соответствующей разрешению, и делился на распределение потоков в континууме, полученное аналогичным способом. Описанная методика, позволяющая рассчитывать синтетические спектры звезд с прямым учетом эффектов бланкетирования и не-ЛТР, реализована в отдельном модуле STAR используемого нами программного комплекса.

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Резонансные линии  $\text{Al I } \lambda\lambda 3944.01, 3961.52 \text{ \AA}$  попадают на участок затухания излучения кривой роста и имеют полностью насыщенные ядра. Поэтому повышение содержания алюминия приводит к заметному увеличению интенсивности в крыльях линий при сохранении интенсивности ядра. Субординатные линии находятся на линейном участке кривой роста, поэтому для них повышение содержания алюминия приводит к усилению доплеровского ядра линий. Не-ЛТР эффекты в населенностях уровней  $\text{Al I}$  сказываются, прежде всего, в высоких слоях атмосферы, вследствие чего существенно уменьшается интенсивность доплеровских ядер резонансных линий. Субординатные линии при этом изменяются незначительно.

Поскольку отклонения от ЛТР начинаются в слоях, где среда становится оптически прозрачной для излучения за порогом ионизации с основного уровня, т.е. на длинах волн  $\lambda < 2070 \text{ \AA}$ , а пороги ионизации со всех возбужденных уровней  $\text{Al I}$  находятся в оптическом и инфракрасном диапазонах спектра, где эффекты ионизации незначительны или отсутствуют, то фотоионизация атомов  $\text{Al I}$  происходит исключительно с основного состояния  $3p$ . Поэтому важнейшим параметром, влияющим на результат определения содержания алюминия в атмосферах звезд, является именно величина порогового сечения с основного уровня атома  $\text{Al I}$ .

Населенности возбужденных уровней определяются рекомбинацией атомов из континуума и цепочками спонтанных переходов с вышележащих уровней. Так как высоковозбужденные уровни связаны ударными переходами со следующей стадией ионизации  $\text{Al II}$ , то их населенности слабо отличаются от случая ЛТР. Однако населенности низковозбужденных уровней, которые заселяются и опустошаются спонтанными переходами в линиях инфракрасного и красного диапазонов, будут отличаться от равновесных ЛТР-населенностей тем сильнее, чем ближе эти уровни расположены к сильно недонаселенному состоянию  $3p$ . В результате на глубинах формирования линий населенности всех уровней  $\text{Al I}$  оказываются меньше, чем в условиях ЛТР, однако при этом практически не зависят от набора сечений фотоионизации (см. рис. 4 в работе [8]). Таким образом, выбор величины сечения фотоионизации с основного уровня атома  $\text{Al I}$  больше всего будет влиять на определение содержания алюминия по линиям резонансного дублета  $\lambda\lambda 3944.01, 3961.52 \text{ \AA}$ .

Для звезды HD 201889 при использовании набора сечений фотоионизации из базы атомных данных TOPbase [1] нам не удалось согласовать профили резонансных линий с теоретическими —

при любых содержаниях ядра теоретических линий остаются заметно слабее наблюдаемых, а увеличение содержания алюминия приводит только к усилению крыльев линий. Для субординатных линий такое согласование оказывается вполне возможным. На рис. 1а показано сравнение наблюдаемых и теоретических профилей резонансных линий с одинаковыми эквивалентными ширинами (при содержании алюминия  $[Al/Fe] = 0.70$  dex), а на рис. 1b — результат согласования профилей субординатных линий, которое достигается при содержании  $[Al/Fe] = 0.40$  dex.

При использовании набора сечений фотоионизации по данным работы Хофсаеса [9] согласование профилей удастся провести как для резонансного дублета  $\lambda\lambda 3944.01, 3961.52 \text{ \AA}$  (рис. 1c), так и для дублета субординатных линий  $\lambda\lambda 6696.03, 6698.68 \text{ \AA}$  (рис. 1d). При этом особо следует подчеркнуть, что согласование профилей удастся достичь при едином содержании алюминия для обеих групп линий:  $[Al/Fe] = 0.33$  dex.

Анализ линий в спектре звезды HD 22879 показывает, что менее сильная линия субординатного дублета  $\lambda 6698.68 \text{ \AA}$  оказывается очень ослабленной, поэтому, учитывая возможные погрешности при проведении континуума, мы выполнили согласование профилей только для резонансного дублета и одной субординатной линии  $\lambda 6696.03 \text{ \AA}$ . Тем не менее, анализ оставшихся линий позволяет сделать те же выводы, что и для HD 201889: согласование профилей резонансных и субординатной линий одновременно удастся достичь только для набора сечений фотоионизации из работы Хофсаеса [9]. Следует отметить, что и в этом случае такое согласование достигается при едином содержании алюминия для обеих групп линий:  $[Al/Fe] = 0.25$  dex (рис. 2c и 2d). Использование более высоких значений сечения фотоионизации по данным TOPbase [1] не позволяет ни получить единого содержания алюминия по обеим группам линий, ни добиться удовлетворительного согласования теоретических и наблюдаемых профилей резонансных линий: см. рис. 2а, где показано сравнение наблюдаемых и теоретических профилей резонансных линий с одинаковыми эквивалентными ширинами (при содержании алюминия  $[Al/Fe] = 0.57$  dex), и рис. 2b — согласование профиля субординатной линии  $\lambda 6696.03 \text{ \AA}$  (при содержании  $[Al/Fe] = 0.32$  dex).

Таким образом, результат согласования теоретических и наблюдаемых профилей линий Al I в спектрах звезд HD 201889 и HD 22879 позволяет сделать вывод о предпочтительности использования данных с более низким сечением фотоионизации [9] при определении содержания алюминия,

особенно по резонансным линиям при исследовании звезд малой металличности. Различие содержания алюминия, определенных с использованием различных наборов атомных данных по субординатным линиям, как это следует из тестовых расчетов, оказывается сравнительно небольшим: приблизительно 0.07 dex. Следовательно, определение содержания алюминия в атмосферах звезд солнечной и умеренно малой металличности (до  $[Fe/H] = -1.5$ ), где для исследования используются субординатные линии, можно проводить с применением любого из рассматриваемых наборов сечений фотоионизации.

## 7. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ АЛЮМИНИЯ В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД ГАЛО

Ранее нами были получены содержания натрия и алюминия в выборке из 160 звезд диска и гало Галактики [11]. Из этой выборки 35 объектов принадлежат к звездам гало и являются гигантами и сверхгигантами малой металличности [38], содержание алюминия в атмосферах которых можно определить только по резонансным линиям  $\lambda\lambda 3944.01, 3961.52 \text{ \AA}$ . Поэтому, с учетом выводов о предпочтительности использования низких сечений фотоионизации [9], мы провели переопределение содержания алюминия для этих объектов.

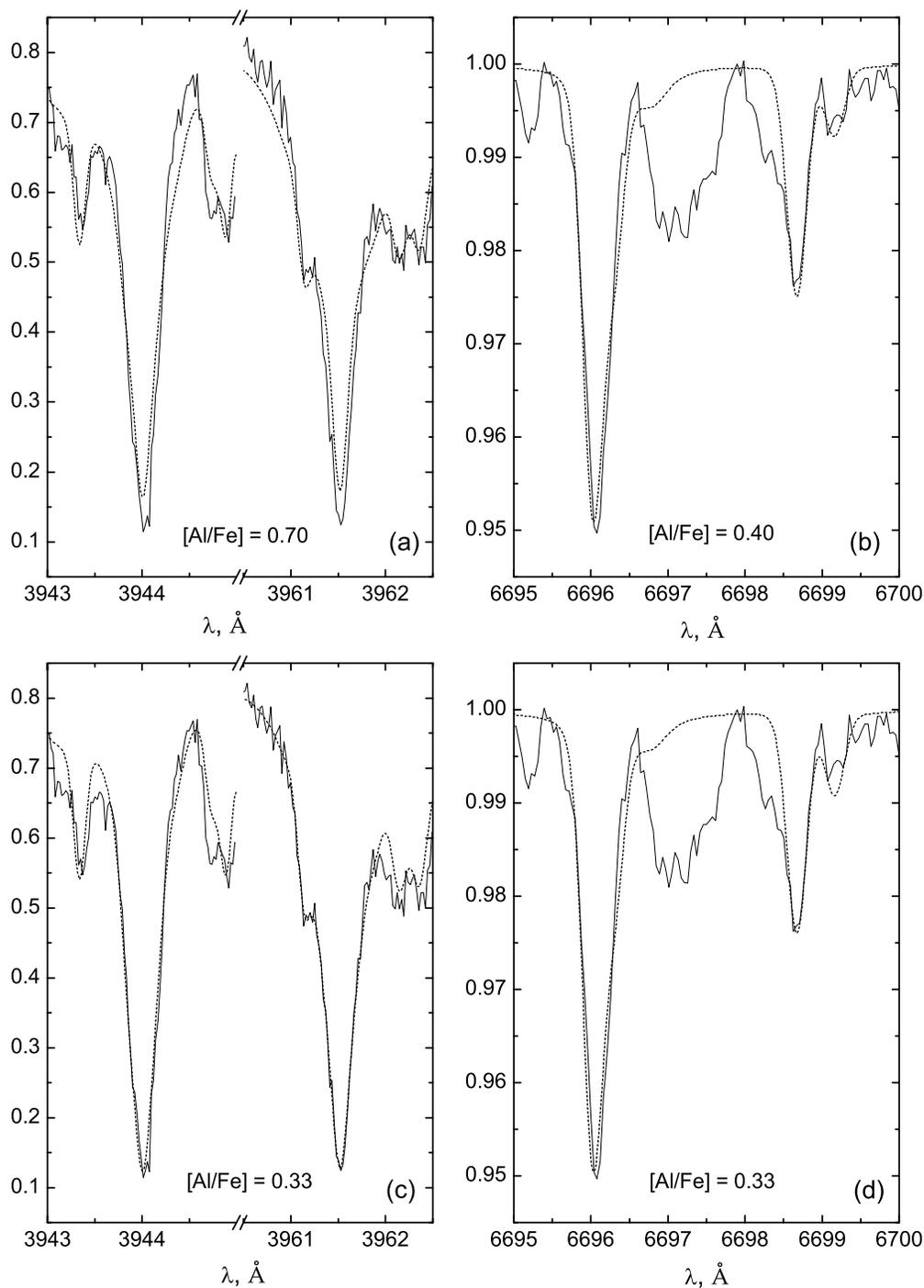
Относительные не-ЛТР содержания алюминия определялись как:

$$[Al/Fe] = \varepsilon_{Al}(Star) - \varepsilon_{Al}(Sun) - (\varepsilon_{Fe}(Star) - \varepsilon_{Fe}(Sun)), \quad (1)$$

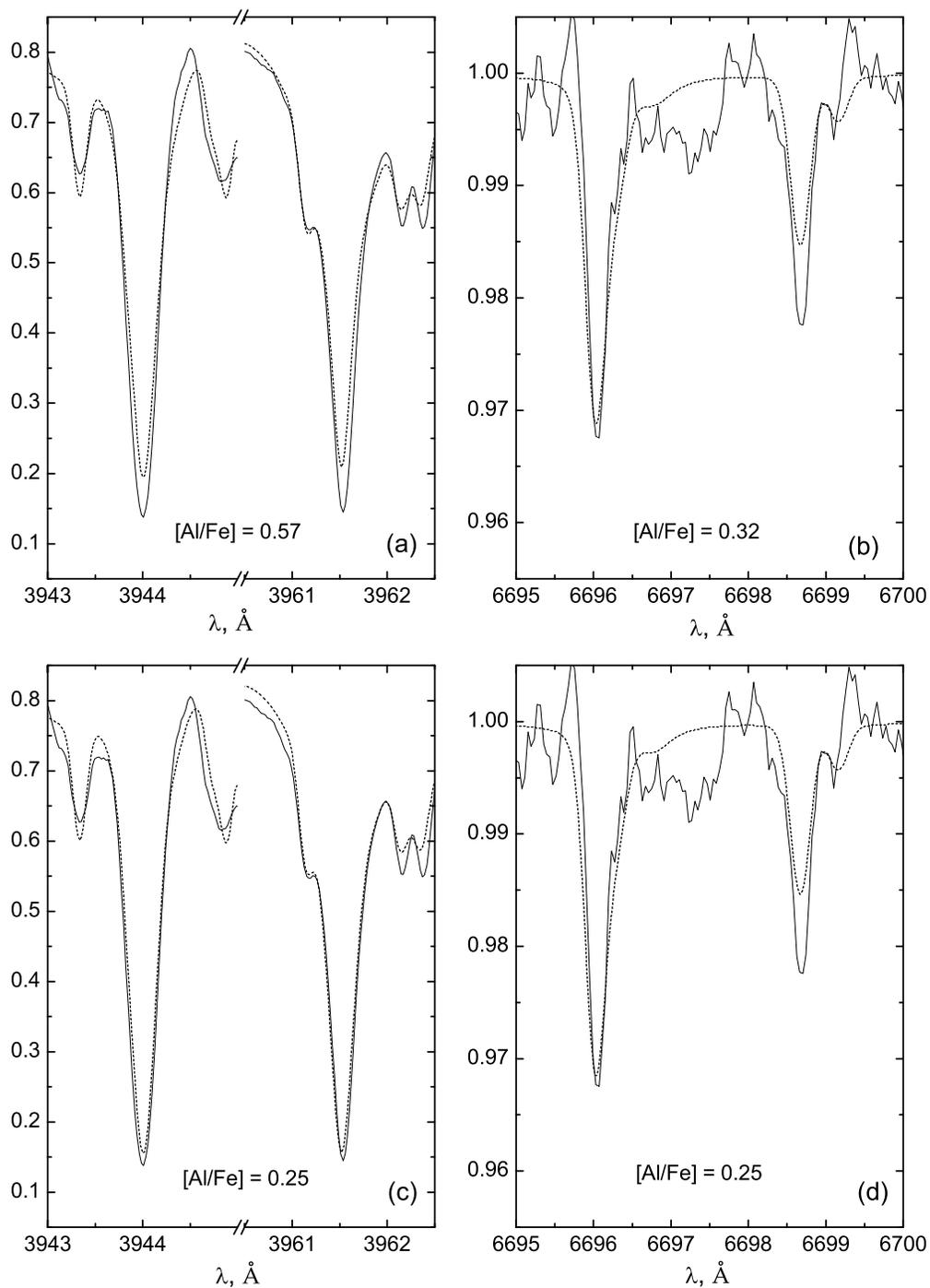
где  $\varepsilon_{Al}(Star)$  и  $\varepsilon_{Al}(Sun)$  — содержания Al в атмосфере звезды и Солнца, соответственно.

В таблице 2 представлены результаты не-ЛТР расчетов с использованием наборов сечений фотоионизации из работ [1] и [9], где символом  $\Delta$  обозначена разница в определении содержания алюминия в двух вариантах расчетов:  $\Delta = [Al/Fe]_{Hof} - [Al/Fe]_{TOP}$ .

Как следует из сравнения результатов, использование низких сечений фотоионизации приводит к уменьшению величины не-ЛТР содержания алюминия в исследуемых звездах (для некоторых объектов — до 0.2–0.3 dex). На рис. 3 представлено полученное нами распределение не-ЛТР содержания  $[Al/Fe]$  в рассматриваемых звездах гало. Сплошной линией на рис. 3 показана теоретическая кривая изменения содержания алюминия из работы Самланда [39], пунктирной линией — из работы Вусли и Вивера [40], штриховой линией — из работы Кобаяши [41]. Рисунок 3 показывает, что теоретические кривые [39] и [40] не соответствуют



**Рис. 1.** Сравнение теоретических (пунктирные линии) и наблюдаемых (сплошные линии) профилей линий Al I в спектре звезды HD 201889. Верхний ряд, (a) и (b), получен при использовании набора сечений фотоионизации по данным TOPbase [1], нижний ряд, (c) и (d), — при использовании данных из работы Хофсаеса [9].



**Рис. 2.** Сравнение теоретических (пунктирные линии) и наблюдаемых (сплошные линии) профилей линий Al I в спектре звезды HD 22879. Верхний ряд, (a) и (b), получен при использовании набора сечений фотоионизации по данным TOPbase [1], нижний ряд, (c) и (d), — при использовании данных из работы Хофсаеса [9].

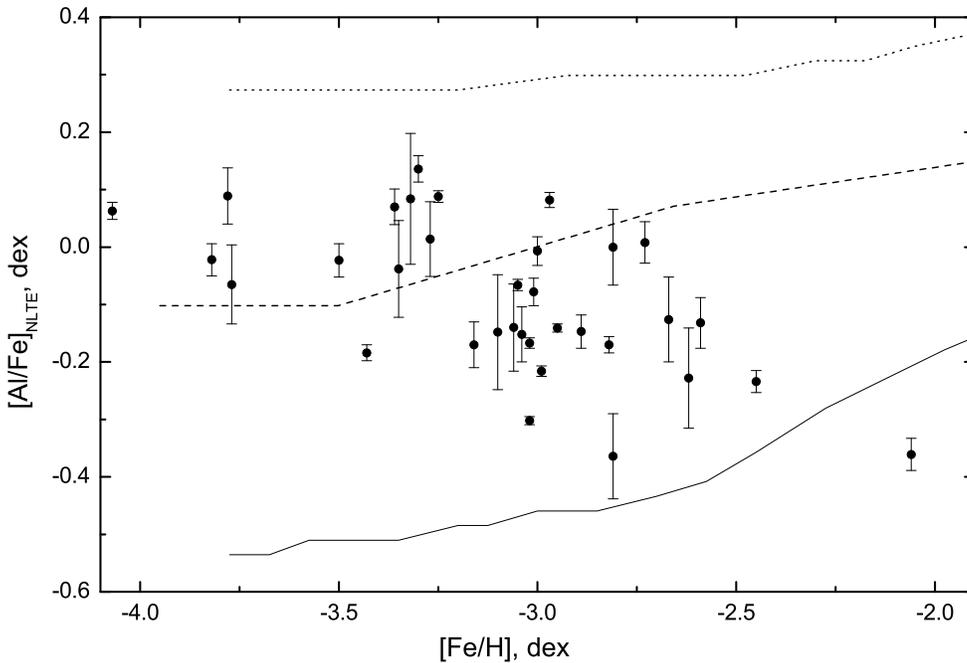


Рис. 3. Не-ЛТР содержания алюминия  $[Al/Fe]_{NLTE}$ – $[Fe/H]$  для звезд гало. Показаны теоретические зависимости из работ Вусли и Вивера [40] (пунктирная линия), Самланда [39] (сплошная) и Кобаяши и др. [41] (штриховая).

Таблица 2. Металличность  $[Fe/H]$  и не-ЛТР содержания алюминия, вычисленные для двух наборов атомных параметров ( $[Al/Fe]_{TOP}$  и  $[Al/Fe]_{Hof}$ ) в звездах гало Галактики

Name	$[Fe/H]$	$[Al/Fe]_{TOP}$	$[Al/Fe]_{Hof}$	$\Delta$	Name	$[Fe/H]$	$[Al/Fe]_{TOP}$	$[Al/Fe]_{Hof}$	$\Delta$
HD 002796	-2.45	-0.05	-0.23	-0.18	CS 22892-052	-2.99	-0.10	-0.22	-0.12
HD 122563	-2.81	0.11	0.00	-0.11	CS 22896-154	-2.73	0.24	0.01	-0.23
HD 186478	-2.59	-0.03	-0.13	-0.10	CS 22897-008	-3.35	0.10	-0.04	-0.14
BD +17°3248	-2.06	-0.08	-0.36	-0.28	CS 22948-066	-3.06	-0.01	-0.14	-0.13
BD -18°5550	-3.05	0.04	-0.07	-0.11	CS 22949-037	-3.99	0.80	0.68	-0.12
CD -38°245	-4.07	0.10	0.06	-0.04	CS 22952-015	-3.36	0.21	0.07	-0.14
BS 16467-062	-3.77	0.00	-0.07	-0.07	CS 22953-003	-2.81	-0.25	-0.36	-0.11
BS 16477-003	-3.27	0.16	0.01	-0.15	CS 22956-050	-3.32	0.20	0.08	-0.12
BS 17569-049	-2.89	-0.04	-0.15	-0.11	CS 22966-057	-2.62	-0.03	-0.23	-0.20
CS 22169-035	-3.02	-0.22	-0.30	-0.08	CS 22968-014	-3.50	0.06	-0.02	-0.08
CS 22172-002	-3.82	0.03	-0.02	-0.05	CS 29491-053	-3.04	-0.05	-0.15	-0.10
CS 22186-025	-3.02	-0.05	-0.17	-0.12	CS 29495-041	-2.82	-0.10	-0.17	-0.07
CS 22189-009	-3.43	-0.07	-0.18	-0.11	CS 29502-042	-3.10	0.00	-0.15	-0.15
CS 22873-055	-2.97	0.15	0.08	-0.07	CS 29516-024	-3.01	0.02	-0.08	-0.10
CS 22873-166	-3.00	0.07	-0.01	-0.08	CS 29518-051	-2.67	0.07	-0.13	-0.20
CS 22873-101	-3.16	-0.10	-0.17	-0.07	CS 30325-094	-3.30	0.30	0.14	-0.16
CS 22885-096	-3.78	0.17	0.09	-0.08	CS 31082-001	-2.95	-0.02	-0.14	-0.12
CS 22891-209	-3.25	0.17	0.09	-0.08					

полученным нами результатам, тогда как кривая из работы [41] качественно согласуется с ними.

Мы провели дополнительные расчеты с применением набора сечений [9] для некоторых звезд в диапазоне металличности  $-1.2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.6$  из рассмотренной ранее выборки [11]. Для определения содержания алюминия в атмосферах этих звезд использовались линии субординатного дублета  $\lambda\lambda 6696.03, 6698.68 \text{ \AA}$ . Различия в определении содержаний  $\Delta = [\text{Al}/\text{Fe}]_{\text{Ног}} - [\text{Al}/\text{Fe}]_{\text{ТОР}}$  составили от  $-0.04$  до  $-0.02 \text{ dex}$ , т.е. несущественны. Таким образом, представленные нами ранее результаты [11] при использовании атомных параметров с меньшими величинами сечения фотоионизации будут несколько скорректированы только для звезд гало. Для звезд тонкого и толстого дисков возможное изменение результатов расчетов не превышает по абсолютной величине  $0.07 \text{ dex}$ , что меньше ошибки определения содержаний химических элементов.

Поэтому мы подтверждаем выводы, сделанные в рамках предыдущей работы [11]. В области с металличностью  $-1.3 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.5$  лучшее согласие достигается между наблюдениями и теоретической зависимостью из работы [40]. Для звезд малой металличности  $-4 < [\text{Fe}/\text{H}] < -2$  (звезды гало из выборки [38]), наблюдаемое не-ЛТР распределение  $[\text{Al}/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$  показывает лучшее согласие с теоретическими прогнозами работы [41].

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большое влияние величины сечения фотоионизации с основного уровня атома Al I на результаты определения содержания алюминия в атмосферах звезд (особенно при использовании для анализа линий резонансного дублета  $\lambda\lambda 3944.01, 3961.52 \text{ \AA}$ ) обуславливает необходимость их точного учета при не-ЛТР моделировании. Поэтому в представленной работе мы провели экспериментальную проверку применимости двух различных наборов сечений ионизации для согласования наблюдаемых и теоретических профилей линий Al I.

Нами показано, что при определении содержания алюминия в атмосферах двух звезд, HD 22879 и HD 201889, одновременно по линиям резонансного и субординатного дублетов согласие теоретических и наблюдаемых профилей линий достигается только при использовании сечений фотоионизации из работы [9] (пороговое сечение фотоионизации с основного уровня  $3p$  атома Al I  $\sigma = 10 \text{ Mb}$ ). Данный вариант расчетов обеспечивает также единство не-ЛТР содержаний алюминия, полученных по разным группам линий. При использовании более высоких сечений из работы [1]

( $\sigma = 57.2 \text{ Mb}$ ) различия теоретических и наблюдаемых профилей линий превышают возможные ошибки наблюдений.

По результатам проведенного анализа мы делаем вывод о предпочтительности использования более низких сечений фотоионизации при определении содержания алюминия в атмосферах звезд, особенно для звезд с низкой металличностью.

Учитывая значительное влияние величины сечения фотоионизации на не-ЛТР содержания Al, мы провели переопределение полученных нами ранее значений  $[\text{Al}/\text{Fe}]$  звезд гало [38]. Исправленные содержания алюминия в атмосферах этих звезд оказываются уменьшенными в среднем на  $0.1-0.15 \text{ dex}$ , что не меняет сделанные нами ранее выводы (см. [11]). Итоговое не-ЛТР распределение  $[\text{Al}/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$ , в целом, имеет качественное согласие с теоретическими данными Кобаяши и др. [41], но сильно (до  $0.4 \text{ dex}$ ) различается как с прогнозами Самланда [39], так и с результатами расчетов Вусли и Вивера [40]. Таким образом, сравнение теоретических и полученных не-ЛТР содержаний алюминия как в звездах диска, так и гало Галактики свидетельствует о необходимости дальнейшего уточнения теории его ядерного синтеза в процессе химической эволюции Галактики.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность Н. А. Сахибуллину за полезные советы при проведении анализа профилей линий, и Д. В. Ивановой за содействие при подготовке и проведении наблюдений. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-02-00351-а. Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.518.11.7070, 16.518.11.7073).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. J. Seaton, C. J. Zeippen, J. A. Tully, et al., *Revista Mexicana Astronom. Astrofis.* **23**, 19 (1992).
2. L. I. Mashonkina, V. V. Shimanskii, and N. A. Sakhbullin, *Astronomy Reports* **44**, 790 (2000).
3. D. V. Ivanova and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **44**, 376 (2000).
4. J. R. Shi, T. Gehren, L. Mashonkina, and G. Zhao, *Astronom. and Astrophys.* **503**, 533 (2009).
5. T. Gehren, C. Reile, and W. Steenbock, in *Proc. NATO Advanced Research Workshop on Problems of Stellar Atmospheres: Beyond Classical Models*, Ed. by L. Crivellari, I. Hubeny, and D. Hummer (Kluwer, Dordrecht, 1991), p. 387.
6. D. Baumuller and T. Gehren, *Astronom. and Astrophys.* **307**, 961 (1996).

7. D. Baumüller and T. Gehren, *Astronom. and Astrophys.* **325**, 1088 (1997).
8. V. S. Menzhevitski, V. V. Shimansky, and N. N. Shimanskaya, *Astrophysical Bulletin* **67**, 294 (2012).
9. D. Hofsäess, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **24**, 285 (1979).
10. D. G. Yakovlev, L. M. Band, M. B. Trzhaskovskaya, and D. A. Verner, *Astronom. and Astrophys.* **237**, 267 (1990).
11. V. S. Menzhevitski, N. N. Shimanskaya, V. V. Shimansky, and N. A. Sakhibullin, *Astrophysical Bulletin* **68**, 243 (2013).
12. Butler K. (private communication).
13. J. L. Kohl and W. H. Parkinson, *Astrophys. J.* **184**, 641 (1973).
14. V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin, and I. Najdenov, *J. Optical Technology* **76**, 87 (2009).
15. N. E. Piskunov and J. A. Valenti, *Astronom. and Astrophys.* **385**, 1095 (2002).
16. E. Hog, C. Fabricius, V. V. Makarov, et al., *Astronom. and Astrophys.* **355**, L.27 (2000).
17. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. Van Dik, et al., *2MASS All Sky Catalog of Point Sources* (2003).
18. R. L. Kurucz, SAO CD-Roms (Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, 1994).
19. F. Van Leeuwen, *Astronom. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).
20. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000).
21. V. V. Shimansky, I. F. Bikmaev, A. I. Galeev, et al., *Astronomy Reports* **47**, 750 (2003).
22. V. V. Shimansky, N. V. Borisov, and N. N. Shimanskaya, *Astronomy Reports* **47**, 763 (2003).
23. F. Castelli and R. L. Kurucz, *IAU Symp.*, No. 210, A20 (2003).
24. В. Ф. Сулейманов, *Письма в АЖ* **22**, 107 (1996).
25. V. F. Suleymanov, *Astron. Astrophys. Transactions* **2**, 197 (1992).
26. N. A. Sakhibullin and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **40**, 723 (1997).
27. S. E. Nersisyan, A. V. Shavrina, A. A. Yaremchuk, *Astrophysics* **30**, 147 (1989).
28. N. N. Shimanskaya, I. F. Bikmaev, and V. V. Shimansky, *Astrophysical Bulletin* **66**, 332 (2011).
29. C. R. Vidal, J. Cooper, and E. W. Smith, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **25**, 37 (1973).
30. H. R. Griem, *Astrophys. J.* **132**, 883 (1960).
31. R. L. Kurucz and I. Furenlid, *Special Report*, No. 387 (Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, 1979).
32. A. Unsöld, *Physik der Sternatmosphären*, (Springer, Berlin–Göttingen–Heidelberg, 1955).
33. D. V. Ivanova, N. A. Sakhibullin, and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **46**, 390 (2002).
34. V. V. Shimansky, S. A. Pozdnyakova, N. V. Borisov, et al., *Astronomy Letters* **34**, 423 (2008).
35. N. N. Shimanskaya, L. I. Mashonkina, and N. A. Sakhibullin, *Astronomy Reports* **44**, 530 (2000).
36. V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **46**, 127 (2002).
37. N. Grevesse and A. J. Sauval, *Space Sci. Rev.* **85**, 161 (1998).
38. R. Cayrel, E. Depagne, M. Spite, et al., *Astronom. and Astrophys.* **416**, 1117 (2004).
39. M. Samland, *Astrophys. J.* **496**, 155 (1998).
40. S. E. Woosley and T. A. Weaver, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **101**, 181 (1995).
41. C. Kobayashi, H. Umeda, K. Nomoto, et al., *Astrophys. J.* **653**, 1145 (2006).

## Effect of Atomic Parameters on Determination of Aluminium Abundance in Atmospheres of Late-Type Stars

V. S. Menzhevitski, N. N. Shimanskaya, V. V. Shimansky, and D. O. Kudryavtsev

We study the effect of the photoionization cross sections for the ground state of Al I on the inferred aluminium abundance in stellar atmospheres. We match the theoretical and observed line profiles of the resonance  $\lambda\lambda 3944.01, 3961.52 \text{ \AA}$  and subordinate  $\lambda\lambda 6696.03, 6698.68 \text{ \AA}$  doublets in high-resolution spectra of the metal-poor solar-type stars HD 22879 and HD 201889. We determine the parameters of these stars from their photometric and spectroscopic data. Our computations show that the profiles can be matched and a single aluminium abundance inferred simultaneously from both groups of spectral lines only with low photoionization cross sections (about 10–12 Mb). Larger cross sections (about 58–65 Mb) make such fits impossible. We therefore conclude that small photoionization cross sections should be preferred for the determination of aluminium abundances in metal-poor stars. We redetermine the aluminium abundances in the atmospheres of halo stars. The resulting abundances prove to be lower by 0.1–0.15 dex than our earlier determinations which does not affect the conclusions based on our earlier estimates. In particular, the NLTE [Al/Fe]–[Fe/H] dependence, on the whole, agrees only qualitatively with the results of theoretical predictions. Therefore further refinement of the theory of nuclear synthesis of aluminium in the process of the chemical evolution of the Galaxy remains a task of current importance.

*Keywords:* stars: abundances—atomic data—stars: atmospheres—lines: profiles—Galaxy: halo—Galaxy: evolution—stars: individual: HD 22879, HD 201889