

УДК 524.3–355.3, 539.184.26, 004.65

СВЕРХТОНКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ В БАЗЕ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ VALD

© 2019 г. Ю. В. Пахомов^{1*}, Т. А. Рябчикова¹, Н. Е. Пискунов²¹Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия²Институт физики и астрономии, Уппсала, Швеция

Поступила в редакцию 24.06.2019 г.; после доработки 05.07.2019 г.; принята к публикации 22.07.2019 г.

Венская база данных атомных параметров спектральных линий VALD дополняется новыми данными и новой функциональностью — возможностью учета эффекта сверхтонкого расщепления (HFS) при анализе профилей линий. Для этого нами создана вспомогательная SQL база данных с постоянными сверхтонкой структуры для 58 изотопов 30 нейтральных и однократно ионизованных атомов. Проведен анализ полноты собранных данных и новых возможностей при исследовании звезд различных спектральных классов. База данных позволяет учитывать расщепление до 60% линий с измеряемым эффектом в ультрафиолетовом ($\lambda \gtrsim 1000 \text{ \AA}$), и до 100% — в видимом и инфракрасном диапазонах ($\lambda \lesssim 25\,000 \text{ \AA}$) для А–М звезд. В спектрах горячих О–В звезд необходимо привлекать лабораторные измерения для атомов второй и выше стадий ионизации.

DOI: 10.1134/S0004629919120065

1. ВВЕДЕНИЕ

VALD (Vienna Atomic Line Database) — база параметров спектральных линий, предназначенная для выборки данных, необходимых в дальнейшем для расчета и анализа звездных спектров [1–3]. Каждая спектральная линия в VALD характеризуется идентификатором элемента, его стадией ионизации, длиной волны λ , вероятностью перехода (сила осциллятора), коэффициентами затухания (радиативного, Штарка, ван дер Ваальса), а также для нижнего и верхнего уровней: энергией возбуждения E , квантовым числом полного момента J , Ландэ-факторами g и описанием электронной конфигурации и терма. В настоящее время данные VALD позволяют достаточно точно описывать наблюдаемые профили большинства спектральных линий. Однако в спектрах высокого разрешения существует ряд линий, профиль которых дополнительно уширен эффектом сверхтонкого расщепления (HFS — hyperfine splitting), для описания которого необходимы дополнительные данные. Без них невозможно получить высокоточные значения содержаний таких элементов, как например, литий, марганец, кобальт, медь и других, в особенности тяжелых элементов. Ошибка в содержании элемента зависит от величины расщепления линии и ее интенсивности и может достигать в некоторых случаях 1 dex и более [4]. Таким образом, во

многих случаях необходимо обязательно учитывать эффект HFS для интерпретации спектров.

Представленная работа посвящена описанию дополнительной к VALD базы данных, позволяющей проводить расчеты теоретических спектров с учетом эффекта сверхтонкого расщепления. В разделе 2 рассмотрены данные, необходимые для расчета профилей расщепленных линий, и описана база данных постоянных HFS. В разделе 3 проводится анализ полноты представленных данных. В разделе 4 мы обсуждаем возможности применения новой функциональности VALD.

2. ЭФФЕКТ СВЕРХТОНКОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ

Эффект сверхтонкого расщепления энергетических уровней в атоме обусловлен взаимодействием магнитного момента ядра с магнитным полем электрона, создаваемым его орбитальным движением [5]. В терминах квантовых чисел с учетом релятивистских эффектов полный момент электрона J взаимодействует с магнитным моментом ядра I , и образуется HFS момент F , который сохраняется и может принимать значения $F = |J - I| \dots |J + I|$. В результате уровень с квантовым числом J расщепляется на $2(\min(I, J) + 1)$ подуровня, а спектральная линия, образованная переходом между уровнями J_l и J_u различных электронных конфигураций, расщепляется на ряд компонентов, число которых

*E-mail: pakhomov@sai.msu.ru

может превышать два десятка. Правила отбора для магнитного дипольного взаимодействия (по аналогии со спин-орбитальным взаимодействием $\Delta J_{lu} = 0, \pm 1$) разрешают переходы с $\Delta F_{lu} = 0, \pm 1$ и запрещают переход $F_l = 0 \rightarrow F_u = 0$. Для переходов $\Delta J_{lu} = \pm 2$, осуществляемых при электрическом квадрупольном взаимодействии, разрешены переходы в расщепленной линии $\Delta F_{lu} = \pm 2$.

Изменение энергии HFS уровня относительно нерасщепленного, характеризуемого квантовыми числами I, J, F , описывается формулой:

$$\Delta E = \frac{1}{2}AK + B \frac{(3/4)K(K+1) - J(J+1)I(I+1)}{2I(2I-1)J(2J-1)}, \quad (1)$$

где $K = F(F+1) - J(J+1) - I(I+1)$, A и B — постоянные сверхтонкой структуры. A характеризует магнитное дипольное взаимодействие, B — электрическое квадрупольное взаимодействие. Относительная интенсивность компонентов вычисляется через $6j$ -символы:

$$I_{rel}(F_l \rightarrow F_u) = \frac{(2F_l+1)(2F_u+1)}{2I+1} \left\{ \begin{matrix} J_l & F_l & I \\ F_u & J_u & 1 \end{matrix} \right\}^2, \quad (2)$$

где последнее число равно 1 при магнитном дипольном переходе, и 2 — при электрическом квадрупольном. При этом выполняется условие $\sum I_{rel} = 1$.

Таким образом, для расчета HFS эффекта необходимо знать для нижнего и верхнего уровней энергии перехода E , квантовые числа J , HFS постоянные A и B , а также магнитный момент ядра рассматриваемого изотопа I . База данных VALD содержит только величины E и J . Значения I можно взять, например, из статьи [6]. HFS постоянные определяются в лабораторных условиях и регулярно публикуются в научных статьях. Поэтому главной задачей стал сбор источников информации по HFS измерениям. Самая полная подборка работ по таким измерениям содержится в компиляции R.L. Kurucz¹, где для некоторых изотопов представлены файлы `ab*.dat`, содержащие данные по выбранному изотопу и величины E, J, A и B для разных уровней, а также библиографические ссылки. Тем не менее в этом источнике некоторые значимые элементы, например, литий, празеодим и др., отсутствуют. Поэтому с помощью SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS) был проведен

поиск статей, содержащих данные по HFS измерениям. Из-за ограниченных возможностей лабораторных измерений HFS данные представлены только для нейтральных и однократно ионизованных атомов, чьи линии наблюдаются в близком УФ ($\lambda \gtrsim 700 \text{ \AA}$), оптическом и ИК диапазонах ($\lambda \lesssim 10^6 \text{ \AA}$).

Накопленный материал был систематизирован в SQL базе данных, где для каждого уровня представлены: элемент, стадия ионизации, идентификатор изотопа внутри VALD (`species ID`), номер элемента, масса изотопа, магнитный момент ядра I , энергия уровня E , квантовое число полного момента уровня J , HFS постоянные A и B и их ошибки, а также ключ библиографического источника, который входит в библиографическую базу VALD в формате BibTeX.

Всего в базе содержатся данные для 3970 уровней, принадлежащих 58 изотопам 30 элементов. Около половины изотопов принадлежат нейтральным атомам, другая половина элементам в первой стадии ионизации. Только для одного элемента, висмута (Bi), есть данные для линий второй стадии ионизации. Список изотопов представлен в табл. 1, где для каждого из них приведено количество уровней в базе данных, минимальное $E_{\min}$ и максимальное $E_{\max}$ значения энергий и минимальное и максимальное значения постоянной A , главным образом определяющего степень HFS расщепления.

При выполнении запроса VALD “select stellar” (выборка только тех спектральных линий, которые могут вносить вклад в спектр звезды с конкретными параметрами атмосферы) в опции, включающей учет HFS эффекта, для каждой выбранной линии выполняется проверка наличия HFS данных для нижнего и верхнего уровней, идентификация которых происходит по значениям E и J для рассматриваемого изотопа. Если данных нет хотя бы для одного уровня, то линия выдается нерасщепленной. Далее проводится вычисление сдвигов уровней энергии ΔE_l и ΔE_u из соотношения (1), возможных переходов $F_l \rightarrow F_u$, согласно правилам отбора, сдвигов длин волн $\Delta \lambda^{F_l \rightarrow F_u} = (\Delta E_l - \Delta E_u)\lambda^2/c$ для каждого компонента, а также их относительной интенсивности $I_{rel}^{F_l \rightarrow F_u}$ из соотношения (2). При этом сила осциллятора нерасщепленной линии $\log(gf)$ для каждого компонента, образованного переходом $F_l \rightarrow F_u$, заменяется на значение $\log(gf) + \log I_{rel}^{F_l \rightarrow F_u}$, длина волны на $\lambda + \Delta \lambda^{F_l \rightarrow F_u}$. Остальные параметры спектральной линии не изменяются. Вместо одной линии в итоговом списке появляется набор спектральных линий по числу HFS компонентов. Поскольку HFS компоненты имеют некоторое распределение значений

¹ <http://kurucz.harvard.edu/atoms>

Таблица 1. Характеристики HFS данных

Изотоп, ион	Число уровней	$E_{\min}$, см ⁻¹	$E_{\max}$, см ⁻¹	$A_{\min}$, МГц	$A_{\max}$, МГц	Изотоп, ион	Число уровней	$E_{\min}$, см ⁻¹	$E_{\max}$, см ⁻¹	$A_{\min}$, МГц	$A_{\max}$, МГц
⁶ Li 1	3	0	14903	-1	152	⁷¹ Ga 1	5	0	38914	299	7255
⁷ Li 1	3	0	14903	-3	401	⁷¹ Ga 2	8	47814	145493	1439	9923
²³ Na 1	60	0	40888	0	885	⁸⁵ Rb 1	3	0	12816	25	1011
²⁷ Al 1	23	0	46183	-99	502	⁸⁷ Rb 1	3	0	12816	84	3417
²⁷ Al 2	44	0	149182	-869	2728	⁸⁹ Y 2	39	0	84275	-241	232
³⁹ K 1	21	0	31765	0	230	⁹³ Nb 2	53	0	40561	-1145	1229
⁴⁰ K 1	5	0	21536	-285	1	⁹⁵ Mo 2	21	0	59840	-919	460
⁴¹ K 1	5	0	21536	0	127	⁹⁷ Mo 2	21	0	59840	-940	470
⁴⁵ Sc 1	45	0	34422	-738	2232	¹²⁷ I 1	107	54633	82615	-1319	4742
⁴⁵ Sc 2	42	0	85832	-480	654	¹²⁷ I 2	61	7087	136733	-630	5294
⁴⁷ Ti 1	34	0	33700	-145	79	¹³⁵ Ba 2	38	0	75945	-11	3591
⁴⁷ Ti 2	80	0	47625	-858	174	¹³⁷ Ba 2	38	0	75945	-11	4018
⁴⁹ Ti 1	34	0	33700	-145	79	¹³⁹ La 2	108	0	66591	-1128	2951
⁴⁹ Ti 2	80	0	47625	-858	174	¹⁴¹ Pr 1	90	6714	34190	-994	1378
⁵⁰ V 1	11	0	18438	141	356	¹⁴¹ Pr 2	293	0	42194	-273	2114
⁵¹ V 1	332	0	46230	-947	1445	¹⁵¹ Eu 2	13	0	27256	-1672	1540
⁵¹ V 2	116	0	90584	-411	1479	¹⁵³ Eu 2	13	0	27256	-743	684
⁵⁵ Mn 1	144	0	61225	-2196	1848	¹⁵⁵ Gd 2	68	2856	40924	-349	407
⁵⁵ Mn 2	221	0	119197	-1151	1604	¹⁵⁷ Gd 2	67	2856	40924	-457	534
⁵⁷ Fe 1	57	0	61064	-40	143	¹⁵⁹ Tb 2	79	0	36000	-271	1700
⁵⁹ Co 1	371	0	60262	-1016	3084	¹⁶⁵ Ho 1	165	0	42381	265	1486
⁵⁹ Co 2	4	17771	56010	149	2398	¹⁷⁵ Lu 1	17	0	40735	-924	4511
⁶¹ Ni 1	6	0	29888	-457	-78	¹⁷⁵ Lu 2	4	0	28503	-2038	4976
⁶³ Cu 1	70	0	71290	-510	5866	¹⁷⁶ Lu 1	19	0	40735	-651	3189
⁶⁵ Cu 1	70	0	71290	-543	6284	¹⁸¹ Ta 1	507	0	59300	-3515	7237
⁶⁷ Zn 1	13	0	80175	0	609	¹⁸¹ Ta 2	210	0	81164	-2348	4960
⁶⁷ Zn 2	2	48481	65441	357	549	²⁰³ Tl 1	2	0	7792	1049	21111
⁶⁹ Ga 1	5	0	38914	239	5726	²⁰⁵ Tl 1	4	0	34159	1061	21315
⁶⁹ Ga 2	8	47814	145493	1109	7794	²⁰⁹ Bi 3	5	0	89236	647	51050

$\Delta\lambda^{F_l \rightarrow F_u}$, то итоговый список линий сортируется по возрастанию длин волн и выдается пользователю.

3. ПОЛНОТА ДАННЫХ

На рис. 1 показано распределение плотности спектральных линий (число линий на 1 Å) по всему доступному в VALD диапазону длин волн от 10

до 10⁶ Å. Самая верхняя кривая (*I*) — данные по всем линиям всех элементов. Около λ 500 Å виден резкий рост числа спектральных линий. Максимум плотности достигает значения около 100 линий на 1 Å и находится в УФ и в оптическом диапазонах. В ИК диапазоне плотность постепенно падает. Примерно каждая третья или четвертая линия принадлежит элементам с ненулевым магнитным

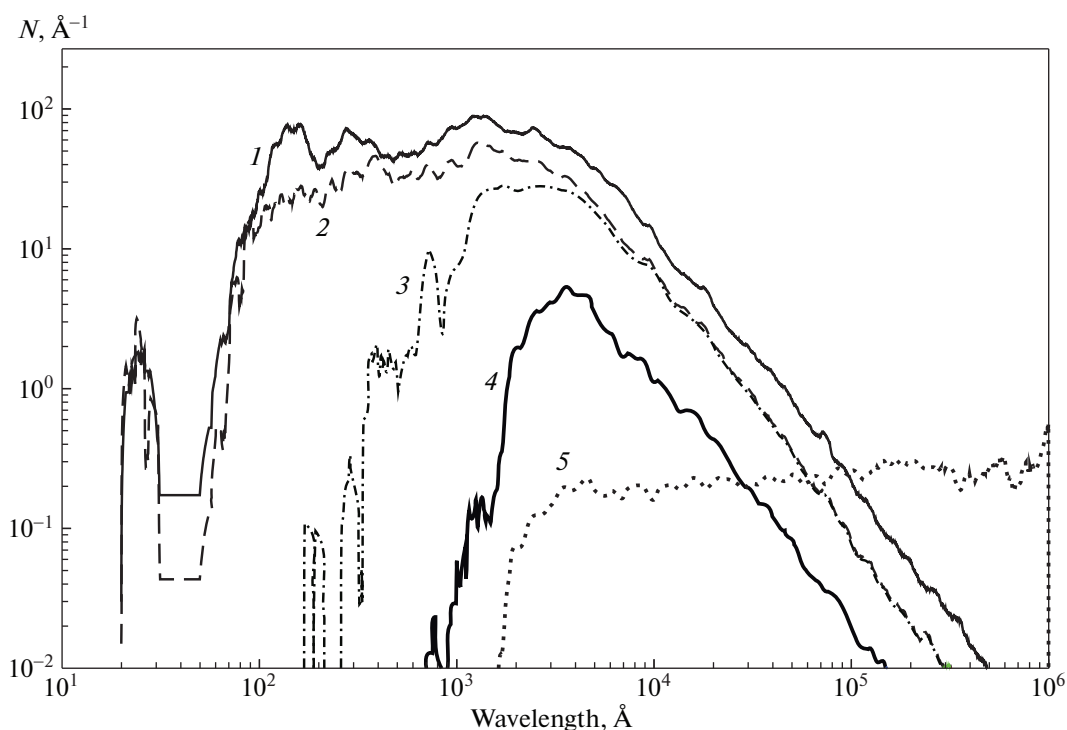


Рис. 1. Распределение количества спектральных линий VALD как функция длины волны. Сверху вниз: все данные VALD (1), линии элементов с ненулевым магнитным моментом ядра (2), то же самое, что и 2, но только для нейтральных и однократно ионизованных атомов (3), линии, для которых в VALD есть HFS данные (4), и доля 4 по отношению к 3 (5).

моментом ядра, то есть она подвержена эффекту HFS (кривая 2). Кривая (3) аналогична предыдущей, но отображает данные только по линиям, принадлежащим нейтральным и однократно ионизованным атомам (в УФ наблюдается провал из-за большого вклада высоко ионизованных атомов). В идеале мы должны описать расщепление всех этих линий. Однако мы ограничены лабораторными данными и в реальности можем описать лишь 10–20% из этого количества (кривая 5) для $\lambda > 1100 \text{ \AA}$. Ограничение по длинам волн возможно связано с трудностями лабораторных измерений в УФ. В далеком ИК доля расщепленных линий достигает 30%, но их количество падает на два порядка.

В оптическом и ближнем ИК диапазонах накопленные данные могут быть полезны для ~20% всех спектральных линий. Такой небольшой процент связан с тем, что VALD содержит данные для большого количества даже весьма слабых линий. Для них лабораторные измерения (λ , E , $\log(gf)$) достаточно надежны, тогда как измерение эффекта HFS представляется сложным, поскольку многие компоненты, необходимые для определения квантовых чисел F и постоянных расщепления, могут быть не видны. В практической звездной спектроскопии большая часть пропущенных слабых линий не играет существенной роли. В связи с этим для оценки

полноты данных необходимо рассмотреть реальные спектральные линии, наблюдаемые в звездных спектрах и используемые для их анализа.

На рис. 2 представлены аналогичные графики для звезд главной последовательности разных спектральных классов. На графиках приведены лишь две кривые, соответствующие вариантам (3) и (4) из рис. 1, то есть плотность полного числа спектральных линий из VALD, образованных нейтральными атомами и элементами в первой стадии ионизации, подверженных эффекту сверхтонкого расщепления, и тех из них, для которых в VALD есть HFS данные. Расчеты выполнены с помощью внутренних команд VALD, соответствующих внешнему запросу "select stellar", в диапазоне длин волн от 912 до 100 000 $\text{\AA}$, в котором число всех атомных линий составляет 956 112, без учета молекулярных. Из них выбраны спектральные линии с глубиной более 0.015 относительно континуума. Такой критерий использован потому, что с одной стороны обеспечивает достаточное качество описания спектров, а с другой стороны отсекает вывод большого количества слабых линий, которые могут быть выбраны вследствие приближенного решения уравнения переноса.

Параметры атмосферы ($T_{\text{eff}}/\log g$) и число спектральных линий для двух критериев выборки (центральная глубина >0.015 и >0.30) для звезд

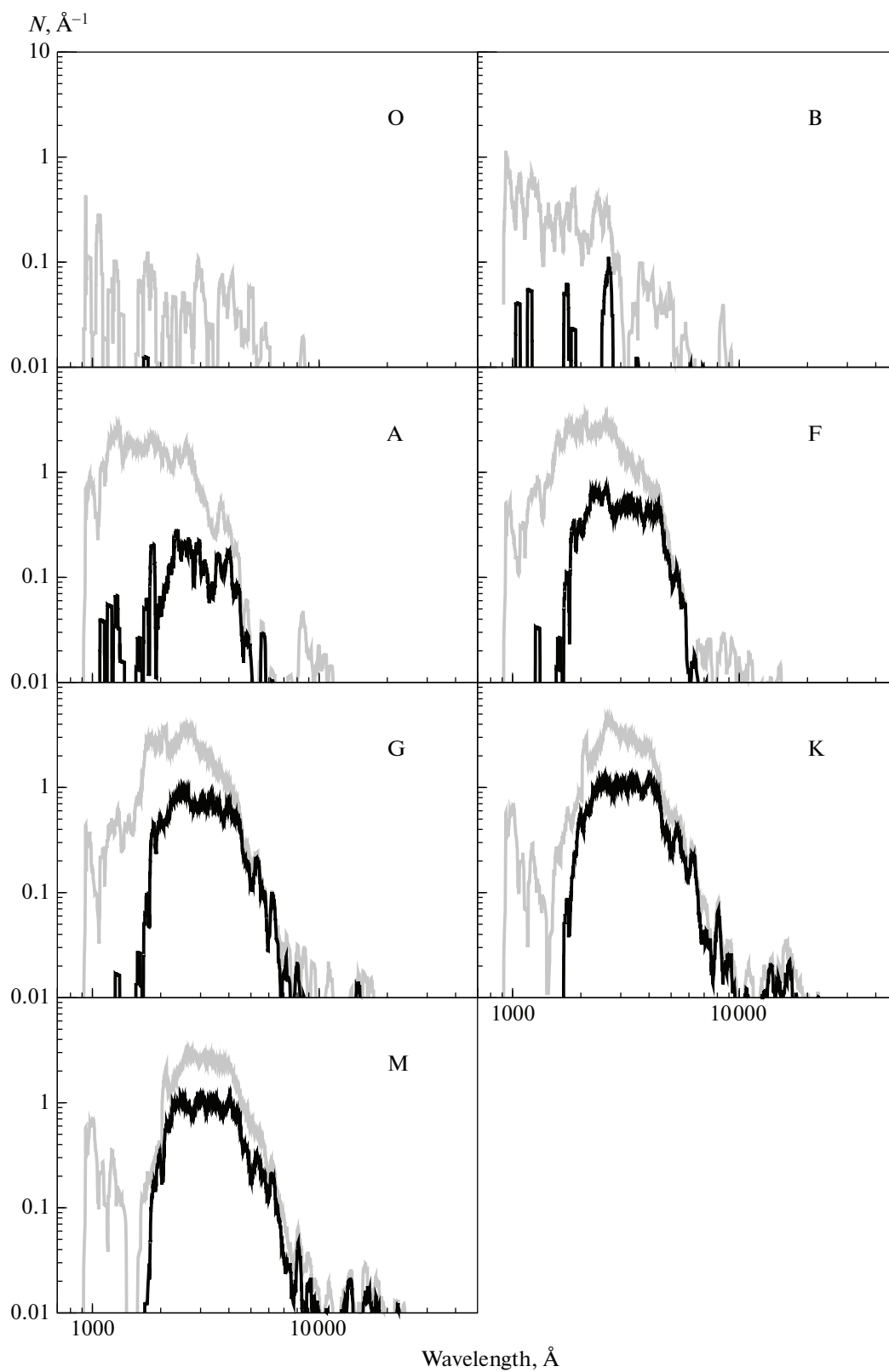


Рис. 2. Распределение количества спектральных линий с расчетной глубиной более 0.015 по данным VALD в спектрах звезд различных классов. Серым цветом отмечены данные для нейтральных и однократно ионизованных атомов элементов с ненулевым магнитным моментом ядра, черным — данные, для которых в VALD есть HFS постоянные.

Таблица 2. Численные характеристики спектров звезд различных спектральных классов

Спектр. класс	$T_{\text{eff}}, \text{K}/\log g$	число выбранных/I, II/расщепленных линий	
		с глубиной > 0.015	с глубиной > 0.3
O	30000/4.0	14796/265/1	2701/245/0
B	20000/4.0	18054/797/41	4787/775/11
A	9500/4.5	20997/3728/406	7064/1065/100
F	7500/4.5	27541/5888/1464	9663/1803/381
G	6500/4.5	29980/6725/2082	11343/2279/671
K	4750/4.5	33224/8242/3322	14045/3005/1436
M	3500/4.5	26434/7148/2985	11514/2810/1415

разных спектральных классов приведены в табл. 2. Данные представлены тремя числами: общее количество выбранных линий, количество линий нейтральных и однократно ионизованных атомов элементов с ненулевым магнитным моментом ядра и количество линий, расщепление которых возможно вычислить с помощью создаваемой базы данных. На рис. 2 в УФ заметен провал количества имеющихся HFS данных. Причина та же, что и при объяснении рис. 1 — трудность лабораторных измерений в УФ, а также тот факт, что в диапазоне до $1200 \text{ \AA}$ преобладают линии атомов и ионов, которые отсутствуют в нашей базе данных. В УФ доля расщепленных линий составляет от 15–20% для горячих звезд и до 50–60% для холодных. Оптический же диапазон, напротив, хорошо исследован в лабораторных условиях. Доля расщепленных линий превышает 50% и доходит до 95%.

Рассматриваемая статистика включает в себя все наблюдаемые в спектре линии, глубина которых больше 0.015 относительно континуума. Однако при анализе профилей отдельных линий нет практического смысла в учете эффекта HFS для очень слабых из них. Поэтому далее мы рассмотрим лишь линии, теоретическая глубина которых составляет более 0.3 относительно континуума. Реальная же глубина линии при свертке с профилями макротурбулентной скорости, вращения звезды и инструментальным профилем будет еще меньше. Например, при $V_{\text{macro}} = 4 \text{ км/с}$, $V_{\text{rot}} = 1 \text{ км/с}$ и $R = 80\,000$ центральная глубина линии уменьшается примерно в два раза. Анализ профиля такой линии для типичного уровня шума наблюдательных данных уже имеет смысл. Количество таких линий в спектрах звезд разных спектральных классов приведено в последнем столбце табл. 2,

откуда видно, что слабые линии доминируют по количеству, особенно в случае горячих звезд.

На рис. 3 показаны результаты, аналогичные рис. 2, полученные для линий с глубиной более 0.3. Для горячих звезд видна существенная разница. Для O-звезд полностью отсутствуют линии, которые могли бы быть расщеплены с помощью накопленных данных. Объяснение этому факту простое: в горячих звездах доминируют линии элементов высоких стадий ионизации, данные которых отсутствуют в нашей базе по причине отсутствия лабораторных HFS измерений, а линии однократно ионизованных атомов слабы. При уменьшении эффективной температуры звезд в их спектрах начинает увеличиваться количество линий атомов и первых ионов. Уже в A-звездах в УФ можно описать 40–60% линий, а в видимом диапазоне почти до 100%. Для более холодных звезд 70–100% — обычная величина доли значимых расщепленных линий.

Статистика по элементам приведена в табл. 3, 4 где дано количество наблюдаемых и расщепленных линий с центральной глубиной > 0.015 и > 0.3 для разных изотопов в спектрах звезд различных спектральных классов. Наибольшей полнотой HFS данных обладают изотопы ^{23}Na 1, ^{45}Sc 2, ^{59}Co 1, а также ^{63}Cu 1, ^{89}Y 2, ^{139}La 2, ^{141}Pr 2, ^{151}Eu 2 и ^{153}Eu 2, для которых мы можем описать почти все множество наблюдаемых линий. Особенно выделяется ^{59}Co 1 — основной изотоп атома кобальта, спектр которого хорошо измерен в лабораториях. В K-звездах наблюдается максимальное число его линий 1463, и 1457 из них расщепляются с помощью нового инструмента VALD.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В базе постоянных HFS собраны данные для основных изотопов, линии которых наблюдаются в

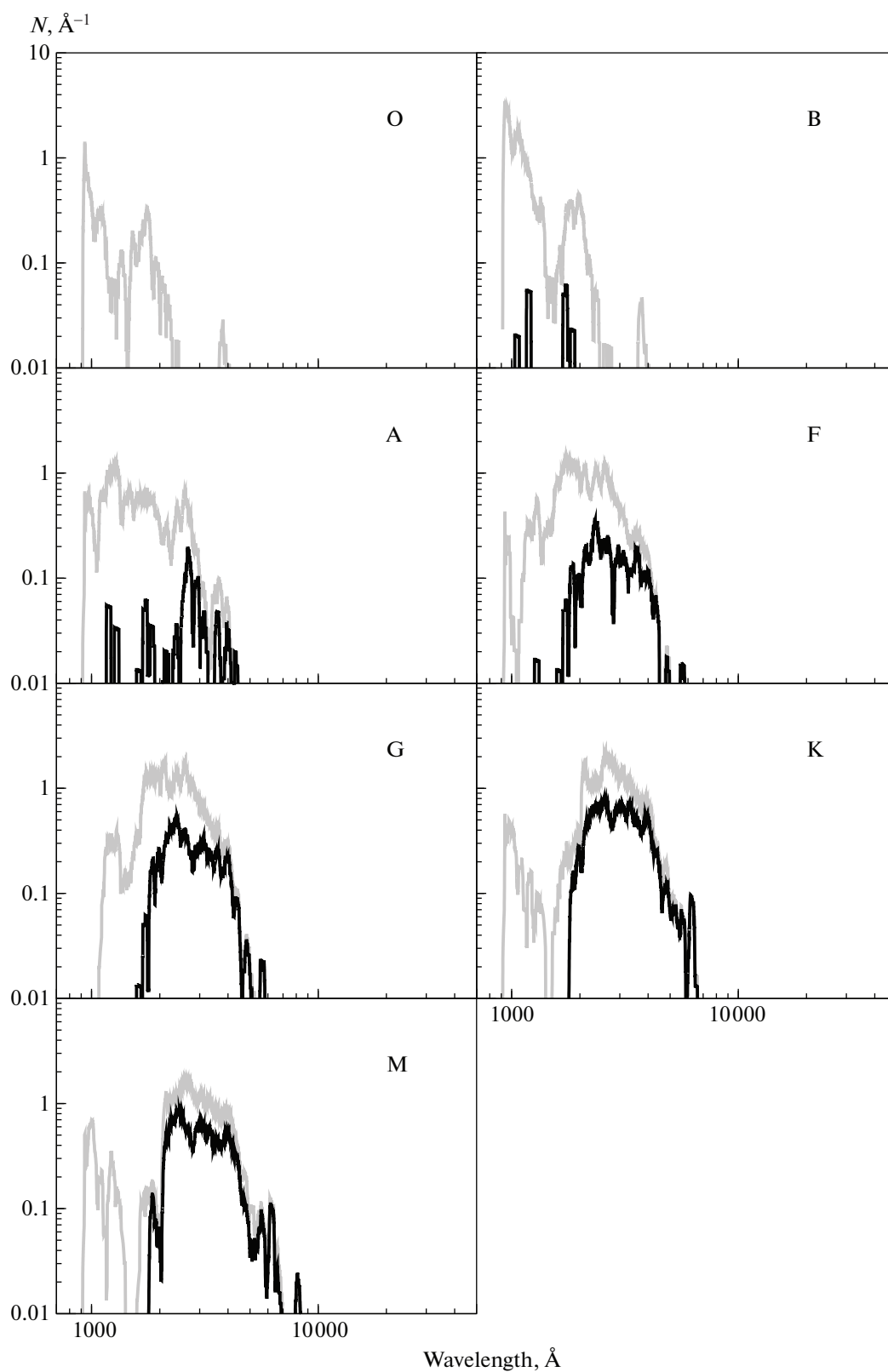


Рис. 3. То же самое, что на рис. 2, только для спектральных линий с расчетной глубиной более 0.3.

спектрах звезд различных спектральных классов, а также данные, которые могут понадобиться в будущем для решения многих задач исследования спектров различных условий плазмы. Из рис. 3

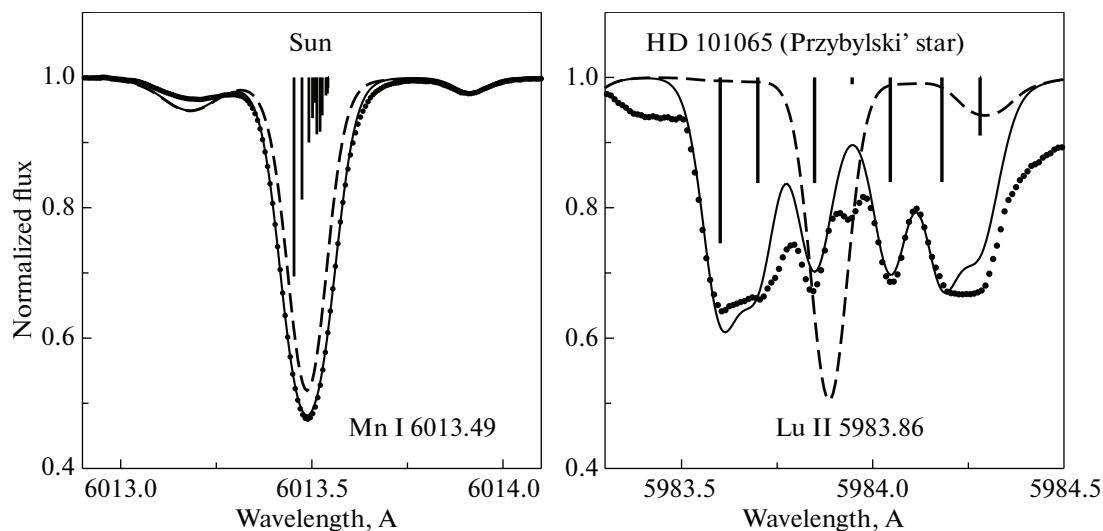


Рис. 4. Пример использования HFS данных. Слева: линия Mn I 6013.49 Å в спектре Солнца. Справа: линия Lu II 5983.86 Å в спектре звезды HD 101065 (звезда Пшибыльского) с аномальным содержанием химических элементов. Вертикальными линиями показан вклад отдельных компонентов.

следует, что для A–M звезд собранные данные позволяют описать расщепление для 70–100% линий в оптическом диапазоне. Для более горячих звезд данных недостаточно, поскольку в их спектрах преобладают линии элементов второй и выше стадий ионизации, для которых лабораторных измерений параметров расщепления исчезающе мало. Однако в целом описание спектра горячих звезд от этого не страдает, поскольку основные элементы (до 90%), образующие линии, не подвержены HFS эффекту.

В базе отсутствуют данные для водорода, ядро которого имеет ненулевой магнитный момент, поскольку перенос энергии в его линиях требует отдельного расчета уширения, которое обычно учитывает сверхтонкое расщепление.

Для ряда изотопов из табл. 3, 4 спектральные линии не выбираются ни для одного спектрального класса звезд. На это есть несколько причин. Во-первых, данные по отдельным изотопам в VALD есть для небольшого количества элементов: Li, Ca, Ti, Cu, Ba и Eu. Для остальных элементов основные параметры в VALD даны для смеси изотопов. Поэтому для них HFS данные приведены только в том случае, если наиболее распространенный изотоп подвержен эффекту HFS. Примером может служить изотоп ^{57}Fe I, для которого мы имеем HFS данные, однако доля этого изотопа составляет всего 0.021 от всех стабильных изотопов железа, а основной изотоп ^{56}Fe I не имеет расщепления. При дальнейшем накоплении данных в VALD по изотопам расчеты расщепления будут выполняться автоматически, без изменений в базе HFS данных. Во-вторых, содержание некоторых элементов,

например йода, может быть очень незначительным для того, чтобы в спектрах нормальных звезд появилась заметная спектральная линия. Однако при повышенном содержании в спектрах звезд они могут быть видны.

Для лития имеются данные всего для трех уровней (значительный HFS эффект проявляется только в основном уровне лития $^2S_{1/2}$) двух стабильных изотопов $^6,^7\text{Li}$ I, что позволяет описать все 15 компонентов тонкой и сверхтонкой структур резонансной линии λ 6707 Å, которая является важной для исследования эволюции химического состава звезд и галактик. В табл. 3, 4 линии лития выбираются только для спектров холодных звезд, но существуют звезды, в спектрах которых линии лития весьма сильны. Это, например, молодые звезды, переменные звезды с активной хромосферой (типа BY Dra, RS CVn). Учет HFS эффекта для линий натрия, алюминия, калия необходим лишь в тех условиях, в которых тепловые или турбулентные скорости не превосходят 1 км/с. Например, расщепление резонансного дублета $D_{1,2}$ составляет всего 0.02 Å, а для других линий еще меньше. С увеличением магнитного момента и отчасти массы ядра HFS расщепление возрастает (см. табл. 1). Для некоторых линий скандия его уже нужно учитывать при анализе звездных спектров. Часть элементов группы железа, чьи линии формируют почти весь спектр звезд, обладают значительным расщеплением уровней, и изменение формы их спектральных линий иногда заметно даже при среднем спектральном разрешении ($R \sim 20\,000$). Это касается ванадия, марганца и кобальта. В любом случае

Таблица 3. Количество наблюдаемых и расщепленных линий с определенной глубиной для разных изотопов в спектрах звезд спектральных классов O, B, A, F

Изотоп	O				B				A				F			
	>0.015		>0.300		>0.015		>0.300		>0.015		>0.300		>0.015		>0.300	
⁶ Li 1																
⁷ Li 1																
²³ Na 1					1	1			13	11	1	1	50	40	5	5
²⁷ Al 1									66	11	17	5	188	18	70	9
²⁷ Al 2	2	1			94	22	23	11	57	14	24	10	27	9	16	7
³⁹ K 1									1	1			8	5	1	1
⁴⁰ K 1																
⁴¹ K 1																
⁴⁵ Sc 1									1	1			15	4		
⁴⁵ Sc 2									91	35	18	10	103	48	27	24
⁴⁷ Ti 1																
⁴⁷ Ti 2																
⁴⁹ Ti 1																
⁴⁹ Ti 2																
⁵⁰ V 1																
⁵¹ V 1									3	3			115	91	7	7
⁵¹ V 2					1				546	128	87	37	796	200	256	88
⁵⁵ Mn 1									60	41	5	5	437	146	66	39
⁵⁵ Mn 2					177	16	4		1466	50	398	25	1430	51	507	32
⁵⁷ Fe 1																
⁵⁹ Co 1									74	74	2	2	597	595	142	142
⁵⁹ Co 2					146	2	2		556	2	206	2	628	2	295	2
⁶¹ Ni 1																
⁶³ Cu 1									43	21	1	1	89	66	27	24
⁶⁵ Cu 1									2	2			17	17	2	2
⁶⁷ Zn 1																
⁶⁷ Zn 2																
⁶⁹ Ga 1									1				4			
⁶⁹ Ga 2					3		1		4		1		2		1	
⁷¹ Ga 1																
⁷¹ Ga 2																
⁸⁵ Rb 1																
⁸⁷ Rb 1																
⁸⁹ Y 2									51	20	4	3	82	31	20	15
⁹³ Nb 2									7	5			69	42	3	3
⁹⁵ Mo 2																

Таблица 3. Окончание

Изотоп	O				B				A				F			
	>0.015		>0.300		>0.015		>0.300		>0.015		>0.300		>0.015		>0.300	
⁹⁷ Mo 2																
¹²⁷ I 1																
¹²⁷ I 2																
¹³⁵ Ba 2													2	2		
¹³⁷ Ba 2									1	1			1	1	1	1
¹³⁹ La 2									5	5			53	53	5	5
¹⁴¹ Pr 1																
¹⁴¹ Pr 2									2	2			36	36		
¹⁵¹ Eu 2									1	1			5	5	1	1
¹⁵³ Eu 2									1	1			6	6	1	1
¹⁵⁵ Gd 2																
¹⁵⁷ Gd 2																
¹⁵⁹ Tb 2									1	1			18	15		
¹⁶⁵ Ho 1																
¹⁷⁵ Lu 1																
¹⁷⁵ Lu 2													6	1		
¹⁷⁶ Lu 1																
¹⁸¹ Ta 1																
¹⁸¹ Ta 2									1	1			38	38		
²⁰³ Tl 1																
²⁰⁵ Tl 1																
²⁰⁹ Bi 3																

для точного определения содержания (точность не менее 0.10 dex) этих элементов, а также меди, необходимо учитывать HFS эффект.

Рис. 4 демонстрирует влияние сверхтонкого расщепления на наблюдаемые профили спектральных линий. На левой панели приведен профиль линии Mn I λ 6013.49 Å в спектре Солнца. Сверхтонкое расщепление не сильно изменяет профиль линии, однако достаточно сильно влияет на интенсивность. Если не учитывать HFS, то придется увеличить содержание Mn в атмосфере на 0.5 dex, чтобы воспроизвести наблюдаемый профиль, который прекрасно описывается современным солнечным содержанием Mn, если учесть сверхтонкое расщепление (черная сплошная линия на рис. 4).

Для описания профилей линий редкоземельных и тяжелых элементов HFS данные крайне важны. Сильное расщепление приводит к тому, что в звездных спектрах высокого разрешения видны даже отдельные HFS компоненты. Особенно это проявляется в спектрах химически пекулярных (Ar) звезд. Это хорошо видно на правой панели рис. 4, где показано сравнение наблюдаемого и синтетического профилей линии Lu II λ 5983.86 Å, в спектре одной из самых пекулярных Ar-звезд — звезды Пшибыльского (HD 101065). Наблюдаемый профиль спектральной линии представляет собой сложную структуру с частичным разрешением отдельных компонентов сверхтонкого расщепления, которую вообще невозможно описать без учета HFS.

Таблица 4. Количество наблюдаемых и расщепленных линий с определенной глубиной для разных изотопов в спектрах звезд спектральных классов G, K, M

Изотоп	G				K				M			
	<0.015		<0.300		<0.015		<0.300		<0.015		<0.300	
⁶ Li 1									1	1		
⁷ Li 1					2	2			3	2	2	2
²³ Na 1	69	51	11	11	108	78	32	30	129	91	48	40
²⁷ Al 1	215	22	114	9	256	36	129	11	208	32	62	11
²⁷ Al 2	18	7	14	7	10	4	2		2		2	
³⁹ K 1	11	7	1	1	23	15	4	3	50	20	8	6
⁴⁰ K 1												
⁴¹ K 1												
⁴⁵ Sc 1	34	10	5	3	207	35	46	13	332	49	100	24
⁴⁵ Sc 2	89	46	30	27	68	45	31	29	37	34	23	22
⁴⁷ Ti 1												
⁴⁷ Ti 2												
⁴⁹ Ti 1												
⁴⁹ Ti 2												
⁵⁰ V 1												
⁵¹ V 1	292	191	31	30	1271	775	426	288	1555	958	689	459
⁵¹ V 2	791	211	291	109	519	177	231	102	237	106	81	44
⁵⁵ Mn 1	649	187	177	75	1092	271	429	143	760	223	325	120
⁵⁵ Mn 2	1243	50	476	33	429	30	144	23	43	11	12	
⁵⁷ Fe 1												
⁵⁹ Co 1	967	963	322	321	1463	1457	722	720	1144	1141	616	615
⁵⁹ Co 2	569	2	300	2	221	2	92	2	43	2	19	
⁶¹ Ni 1												
⁶³ Cu 1	115	75	43	39	174	96	72	56	181	73	140	56
⁶⁵ Cu 1	22	22	8	8	29	29	16	16	21	21	14	14
⁶⁷ Zn 1												
⁶⁷ Zn 2												
⁶⁹ Ga 1	6		2		12		8		13		11	
⁶⁹ Ga 2	1		1		1		1		1			
⁷¹ Ga 1												
⁷¹ Ga 2												
⁸⁵ Rb 1					2	1			5	1	1	1
⁸⁷ Rb 1												
⁸⁹ Y 2	77	34	23	19	49	34	23	21	24	22	14	13
⁹³ Nb 2	125	58	13	12	112	60	25	23	38	36	1	1
⁹⁵ Mo 2												

Таблица 4. Окончание

Изотоп	G				K				M			
	<0.015		<0.300		<0.015		<0.300		<0.015		<0.300	
⁹⁷ Mo 2												
¹²⁷ I 1												
¹²⁷ I 2												
¹³⁵ Ba 2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1
¹³⁷ Ba 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
¹³⁹ La 2	66	66	9	9	78	78	16	16	48	48	11	11
¹⁴¹ Pr 1									29			
¹⁴¹ Pr 2	44	44			65	64	5	5	79	78	13	13
¹⁵¹ Eu 2	6	6	1	1	6	6	3	3	5	5	3	3
¹⁵³ Eu 2	6	6	3	3	6	6	4	4	6	6	4	4
¹⁵⁵ Gd 2												
¹⁵⁷ Gd 2												
¹⁵⁹ Tb 2	32	29			61	53	3	3	47	40	4	4
¹⁶⁵ Ho 1					2	1			11	5	2	1
¹⁷⁵ Lu 1					4				22	4	5	
¹⁷⁵ Lu 2	11	1			11	1	1	1	3	1	1	1
¹⁷⁶ Lu 1												
¹⁸¹ Ta 1					26	26			41	41	5	5
¹⁸¹ Ta 2	79	73	1	1	41	38	1	1				
²⁰³ Tl 1												
²⁰⁵ Tl 1					5	1	1	1	7	1	4	1
²⁰⁹ Bi 3												

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана база данных постоянных HFS для VALD, с помощью которой можно описать HFS расщепление линии для нейтральных и однократно ионизованных атомов. База обладает существенной полнотой для анализа спектров А–М звезд в ближнем УФ, оптическом диапазоне и ИК. Для исследования спектров горячих О–В звезд необходимо привлекать лабораторные измерения для атомов второй и выше стадий ионизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, W. W. Weiss, and C. S. Jeffery, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 525 (1995).
2. F. Kupka, N. Piskunov, T. A. Ryabchikova, H. C. Stempels, and W. W. Weiss, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119 (1999).
3. T. Ryabchikova, N. Piskunov, R. L. Kurucz, H. C. Stempels, U. Heiter, Y. Pakhomov, and P. S. Barklem, *Physica Scripta* **90**(5), id. 054005 (2015).
4. A. A. Boyarchuk, L. I. Antipova, and Y. V. Pakhomov, *Astron. Rep.* **52**, 630 (2008).
5. И. И. Собельман, *Введение в теорию атомных спектров* (М.: Физматгиз, 1963).
6. K. J. R. Rosman and P. D. P. Taylor, *J. Phys. and Chem. Ref. Data* **27**, 1275 (1998).