

ЭФФЕКТЫ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ЛТР В ЛИНИЯХ РУБИДИЯ У ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗД

© 2020 г. С. А. Коротин^{1*}

¹Крымская Астрофизическая Обсерватория, Научный, Крым, Россия

Поступила в редакцию 14.06.2020 г.

После доработки 21.06.2020 г.; принята к публикации 25.06.2020 г.

Рассмотрено формирование резонансных линий рубидия с учетом влияния эффектов отклонения от локального термодинамического равновесия (ЛТР). Составлена модель атома рубидия с использованием 29 уровней Rb I и основного уровня Rb II. Выполнены неЛТР вычисления для сетки моделей атмосфер с T_{eff} от 3500 до 6500 К, $\log g$ от 1.0 до 5.0, $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -1.0 до $+0.5$, $V_t = 1.0$ км/с и относительным содержанием рубидия $[\text{Rb}/\text{Fe}] = 0.0$. Показано, что неучет влияния эффектов отклонения от ЛТР может приводить к значительным ошибкам в определении содержания этого элемента. При этом величина неЛТР-поправок для звезд-карликов с эффективными температурами ниже 4000 К критически зависит от учета ударных взаимодействий с атомами водорода. Различия в содержании рубидия при использовании детальных квантовомеханических расчетов и теоретического приближения Дравина для учета скоростей столкновений атомов с атомами водорода могут достигать 0.17 dex. По линиям в спектре Солнца определено содержание рубидия $(\text{Rb}/\text{H}) = 2.35 \pm 0.05$, которое практически совпадает с содержанием рубидия, получаемым из анализа метеоритов $(\text{Rb}/\text{H}) = 2.36 \pm 0.03$.

Ключевые слова: звездные атмосферы, формирование спектральных линий, содержание рубидия в звездных атмосферах

DOI: 10.31857/S0320010820080021

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию содержания рубидия и его распространения в Галактике посвящено очень незначительное число работ. Связано это в первую очередь с тем, что из-за особенностей строения энергетических уровней рубидий имеет в оптической области спектра только две спектральные линии, которые удается исследовать — это резонансные линии λ 7800 и 7947 Å. При этом резонансные линии у звезд спектральных классов G и K относительно слабы и часто блендируются линиями как звездной фотосферы, так и земной атмосферы. Положение осложняется для звезд с дефицитом металлов: линии рубидия при металличностях ниже $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.5$ становятся практически недетектируемыми. На данный момент есть только одно исследование Томкин, Ламберт (1998), где получена оценка содержания рубидия у нескольких десятков G-K звезд с металличностью от околосолнечной, до $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.0$. При этом у исследователей химической эволюции Галактики в настоящее время

нет общего мнения о деталях сценария обогащения рубидием межзвездной среды.

На основании анализа распространенности рубидия в Солнечной системе, в работах Снедена и др. (2008), Пранзоса и др. (2020) сделан вывод о том, что в производстве рубидия в одинаковой степени участвуют g- и s-процессы ядерных реакций нейтронных захватов. Напомним, что реакции захвата нейтронов ядрами элементов в зависимости от плотности потока нейтронов разделяются на быстрый — g-процесс и медленный — s-процесс. Если для протекания s-процессов достаточно температур и потоков нейтронов в недрах звезд средних и больших масс на определенных стадиях их эволюции, то g-процессы протекают в моменты взрывов сверхновых II типа. В работе Пранзоса (2018) по исследованию химической эволюции в окрестностях Солнца сделан вывод о том, что в обилие рубидия вносят существенный вклад как “основной” s-процесс, так и “слабый” s-процесс. “Основной” s-процесс (при котором производятся элементы с атомным номером более тяжелым, чем рубидий) связывают с горением гелия в двойном слоевом источнике звезд малых и средних масс асимптотической ветви гигантов (АВГ) (Кристалло

*Электронный адрес: serkor1@mail.ru

и др., 2011; Каракас, Латтанзио, 2014). “Слабый” s-процесс отождествляется с горением гелия и углерода в ядрах массивных звезд (Лимонжи, Чиеффи, 2018). Поскольку производство рубидия тесно связано с величиной потока нейтронов в слоевом источнике АВГ-звезд, а поток нейтронов, в свою очередь, зависит от массы звезды, то в настоящее время делаются попытки использовать соотношение содержания рубидия и циркония для оценок масс АВГ-звезд (Шейеламма и др., 2020). В то же время есть определенные трудности с объяснением больших избытков рубидия у холодных звезд асимптотической ветви гигантов (Гарсия-Хернандес и др., 2006).

С другой стороны, ситуация с определением источников г-процесса и темпов его вклада в обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами далека от ясности. Это хорошо видно из обзоров Кован и др. (2019) и Тилеман и др. (2017). До настоящего времени наблюдаемое распределение элементного и изотопного содержания г-процесса в Солнечной системе не удалось воспроизвести при помощи численного моделирования в предложенных сценариях.

По содержанию в атмосферах звезд химических элементов, происхождение которых связано с той или иной ядерной реакцией нейтронных захватов, можно составить картину изменения химического состава межзвездной среды в процессе жизни Галактики. Обычно в качестве типичного индикатора s-процесса используется барий, а содержание европия указывает на г-процесс. Рубидий примечателен тем, что эффективность его образования в s- и г-процессах практически одинакова. Поэтому исследование зависимости содержания этого элемента от металличности в атмосферах звезд поздних спектральных классов особенно интересно. Это может позволить выяснить, как изменялся со временем вклад обоих процессов захвата нейтронов. В упомянутой ранее работе Томкина и Ламберта (1999) обнаружено, что у звезд с дефицитом металлов рубидий находится в избытке относительно железа. Для 32 звезд с $[Fe/H] < -0.5$ получено среднее относительное содержание рубидия $[Rb/Fe] = +0.21$. Из этого авторами сделан вывод, что зависимость $[Rb/Fe]$ от $[Fe/H]$ ведет себя аналогично соотношению $[Eu/Fe]$, т.е. демонстрирует поведение, подобное г-процессу. Следует отметить, что разброс между индивидуальными определениями содержания достаточно велик и достигает 0.6 dex. Возможно, это является результатом влияния вклада в обогащение межзвездной среды продуктами основного s-процесса. Ведь как было показано в работе Травальо и др. (1999), звезды АВГ начали производство s-ядер, когда содержание железа в Галактике достигло $[Fe/H] = -1$ или

даже ранее. Для понимания деталей процесса обогащения межзвездной среды рубидием, исследований, проведенных в работе Томкина и Ламберта (1998), недостаточно. Кроме того, остается неясным вид зависимости $[Rb/Fe]$ от $[Fe/H]$ при больших металличностях. Для звезд с околосолнечным содержанием тяжелых элементов можно ожидать заметного вклада результатов s-процесса (Пранзос, 2018). Таким образом, требуется продолжить исследования содержания рубидия в атмосферах холодных звезд в широком диапазоне содержания тяжелых элементов.

При этом остается неясным, насколько обоснованно можно полагаться на результаты определения обилия рубидия, проведенные при использовании анализа в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР, LTE). До настоящего времени оценок влияния неЛТР-эффектов на резонансные линии рубидия не проводилось. Целью настоящей работы является проверка, насколько эффекты отклонения от ЛТР могут влиять на определение содержания этого химического элемента.

В следующем разделе описана модель атома рубидия, методика неЛТР расчетов населенностей. Затем мы анализируем линии рубидия в солнечном спектре и сравниваем результаты своих расчетов с данными ЛТР-анализа других авторов. После этого мы анализируем поведение отклонений населенностей уровней Rb I от ЛТР в зависимости от параметров атмосферы звезд, проиллюстрированное рассчитанной нами сеткой неЛТР-поправок, и представляем выводы.

МОДЕЛЬ АТОМА РУБИДИЯ

Как упоминалось ранее, атом рубидия имеет только две линии, которые можно использовать для определения его содержания в звездных атмосферах. Структура энергетических уровней Rb I очень похожа на структуры атомов калия и натрия. Известно, что на резонансные линии этих щелочных элементов сильно влияют эффекты отклонения от ЛТР. При этом содержание рубидия на несколько порядков меньше содержания натрия и калия, и поэтому его резонансные линии относительно слабы и образуются в глубине фотосферы. Однако по аналогии с другими щелочными элементами можно ожидать, что его линии также могут подвергаться воздействию неЛТР-эффектов.

Наша модель атома рубидия включает в себя 29 уровней Rb I до главного квантового числа $n \leq 12$ и орбитального квантового числа $l \leq 4$, а также основного состояния Rb II. Наименьшая энергия ионизации достигается у уровня 12s и составляет 0.17 эВ, что позволяет использовать

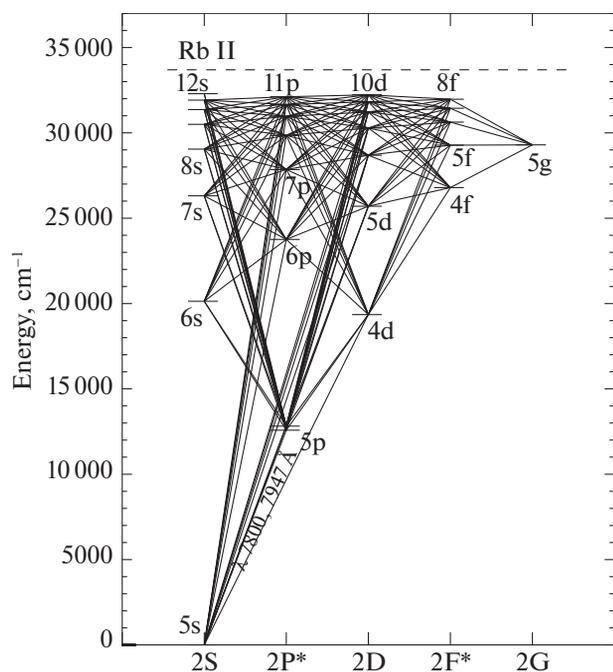


Рис. 1. Схема электронных уровней и переходов модели атома рубидия.

данную модель при температурах в фотосфере выше 2000 К. Диаграмма Гротриана используемой модели атома приведена на рис. 1. Радиационные переходы между более высокими уровнями очень слабы и не могут повлиять на точность определения населенностей нижних уровней атома. Тонкая структура рассматривалась только для уровня $5p^2P^{\circ}$, поскольку она тесно связана с наиболее важными переходами в атоме рубидия, включая резонансные линии. Рубидий в атмосферах холодных звезд существует практически только в виде Rb II, поскольку потенциал ионизации нейтрального рубидия составляет всего 4.18 эВ. В свою очередь все возбужденные уровни Rb II отделены от основного более чем на 16.5 эВ. Таким образом, дополнительные 180 уровней Rb I и 15 уровней Rb II были включены в модель только для сохранения числа частиц. Значения энергии возбуждения всех термов взяты из работы Сансонетти (2006).

При расчетах численности населения уровней были учтены радиативные процессы во всех 160 разрешенных и интеркомбинационных связанно-связанных переходах между 29 уровнями атома рубидия. Силы осцилляторов для 78 переходов, соединяющих нижние 6 уровней между собой и со всеми остальными, были взяты из работ Виз, Мартин (1980), Варнер (1968) и Вондергольц и др. (1984). Для остальных переходов данные на настоящее время отсутствуют. Сравнение известных сил осцилляторов соответствующих переходов в атомах калия и рубидия показали, что их величины очень близки между собой. Отличия составляют

не более 30%. Поэтому еще для 17 разрешенных переходов силы осцилляторов были взяты равными аналогичным переходам в атоме калия (Виз и др., 1969). Неизвестные силы осцилляторов для разрешенных переходов между уровнями с энергией более 3.8 эВ — равными $\log gf$ той же серии, но с меньшей энергией уровней. Как показали тестовые расчеты, варьирование величины $\log gf$ этих переходов на два порядка не оказывает заметного эффекта на населенности нижних уровней рубидия.

Для основного состояния Rb I применялись экспериментальные значения сечения фотоионизации, полученные в работе Марр и Крик (1968) и дополненные расчетами Хофсаесса (1977). Как и для основных уровней натрия и калия, сечение фотоионизации имеет очень маленькую пороговую величину — всего лишь $6.4 \times 10^{-20} \text{ см}^2$, что критически сказывается на процессах фотоионизации. Для остальных уровней мы использовали водородоподобное приближение. Тестовые расчеты с варьированием величины порогового сечения фотоионизации возбужденных уровней на порядок не показали значимого изменения населенностей нижних уровней рубидия.

Мы включили в модель расчеты скоростей ударных переходов между первыми шестью уровнями Rb I, согласно работе Вайнштейн и др. (1979). Для других ударных переходов между уровнями с энергиями ниже 3.9 эВ были применены расчеты Парк (1971). Для остальных связанно-связанных ударных переходов мы использовали формулы для разрешенных переходов, предложенную ван Режемортером (1962), и для запрещенных переходов — из работы Аллена (1973). Скорости ударной ионизации электронами рассчитывались по формуле Ситона (1962).

Столкновения с атомами водорода для первых девяти уровней были учтены с помощью детальных квантовомеханических расчетов из работы Яковлевой и др. (2018). Для других уровней использовалось теоретическое приближение Дравина (1969) для расчета скоростей столкновений атомов с атомами водорода в форме, предложенной Стинбоком и Холвегером (1984), с поправочным коэффициентом $S_H = 0.05$. Величина поправочного коэффициента была принята по аналогии с его оценками для модели калия (Жанг и др., 2006; Андриевский и др., 2010). Пробные расчеты показали, что варьирование величины S_H от 0. до 1.0 практически не влияет на исследуемые линии в спектрах, как звезд-карликов, так и гигантов в диапазоне температур от 3500 до 6500 К. Изменения не превышали 0.1% эквивалентной ширины линии (EW). Основную роль играют процессы, происходящие с участием нижних уровней атома, для которых

применялись детальные расчеты Яковлевой и др. (2018).

Для проверки нами были сделаны аналогичные расчеты с использованием ударных скоростей с водородом, получаемых при использовании теоретического приближения Дравина (1969) для всех уровней модели. Оказалось, что формула Стинбока и Холвегера (1984) даже с поправочным коэффициентом 0.05 дает более высокие значения ударных скоростей (например, для резонансных переходов они на 3–4 порядка больше), чем следует из расчетов Яковлевой и др. (2018). Поэтому для всех звезд с высокой силой тяжести на поверхности мы получили более маленькие абсолютные величины неЛТР-поправок. Особенно большие различия возникли для звезд с $T_{\text{эфф}} < 4000$ К, у которых неЛТР-поправки стали практически независимыми от температуры и небольшими по величине. Различие в величине неЛТР-поправок, рассчитанных по разным вариантам учета ударных скоростей, для карликов с околосолнечной металличностью и $T_{\text{эфф}} = 3500$ К может достигать 0.17 dex. Для гигантов метод учета столкновений с водородом особого влияния не имеет из-за малой плотности их атмосфер.

Населенности уровней Rb I определялись с использованием программного комплекса MULTI (Карлссон, 1986), модифицированного нами (Коротин и др., 1999) для возможности применять в расчетах блок непрозрачностей программы расчета звездных атмосфер ATLAS9 (Кастелли, Куруз, 2003). Во всех вычислениях мы использовали плоскопараллельные, однородные модели атмосфер, рассчитанные по программе ATLAS9 в варианте Месзарос и др. (2012) с обновленными обширными списками поглощения на молекулярных линиях, что критически важно при расчетах атмосфер холодных звезд.

Так как исследуемые линии рубидия часто блендируются линиями других атомов и молекул, то для проведения сравнения с наблюдаемым спектром мы рассчитывали по программе MULTI коэффициенты отклонения от ЛТР-населенностей — b -факторы ($b = n_{\text{nonLTE}}/n_{\text{LTE}}$) — и передавали их в программный комплекс SynthV (Цымбал, 1996), предназначенный для моделирования синтетического звездного спектра. В синтетический спектр входили все линии в заданном диапазоне из списка линий базы данных VALD (Рябчикова и др., 2015), рассчитанные в ЛТР, и интересующие нас линии рубидия, функция источников и коэффициент непрозрачности которых вычислялись по соответствующим b -факторам.

Параметры резонансных линий Rb I λ 7800 и 7947 Å известны с хорошей точностью. В работе

Мортон (2000) критически проанализированы результаты экспериментальных и расчетных данных по силам осцилляторов и рекомендованы значения $\log gf = 0.144$ для λ 7800 Å и $\log gf = -0.134$ для λ 7947 Å. Анализ этих линий осложняется тем, что они имеют сложную, многокомпонентную структуру из-за сверхтонкого расщепления уровней (hfs). Мы использовали для расчета сдвигов компонент линий постоянные магнитного дипольного расщепления $A(J)$ и постоянные электрического квадрупольного расщепления $B(J)$, приведенные в работе Гривесса и др. (2015) для соотношения изотопов рубидия ^{85}Rb к $^{87}\text{Rb} = 0.722/0.278$. Параметры используемых компонент сверхтонкой структуры резонансных линий рубидия приведены в табл. 1.

АНАЛИЗ ЛИНИЙ РУБИДИЯ В СПЕКТРЕ СОЛНЦА

Обе линии рубидия в спектре Солнца очень слабые и искажены как сильными близкорасположенными линиями солнечной фотосферы, так и линиями земной атмосферы. Линия 7800 Å находится в правом крыле сильной линии кремния, а на линию 7947 Å накладывается линия водяного пара. Гривесс и др. (2015) сделали попытку оценить эквивалентные величины линий рубидия в спектре Солнца, очистив их от влияния блендирующих линий. По полученным величинам 6.7 и 2.7 mÅ ими определено содержание в приближении ЛТР (Rb/H) = 2.53 и 2.42 соответственно. Эти величины несколько выше обилия рубидия (Rb/H) =

Таблица 1. Параметры линий рубидия

λ , Å	$\log gf$	λ , Å	$\log gf$
7800.259	0.144	7947.597	-0.164
λ , Å	$\log gf_{hfs}$	λ , Å	$\log gf_{hfs}$
7800.183	-1.197	7947.507	-1.204
7800.186	-1.197	7947.524	-1.903
7800.188	-1.595	7947.563	-0.803
7800.233	-0.893	7947.570	-1.347
7800.234	-0.796	7947.626	-0.900
7800.235	-0.909	7947.634	-0.803
7800.292	-0.432	7947.651	-1.204
7800.295	-0.796	7947.668	-1.204
7800.296	-1.340		
7800.317	-0.750		
7800.322	-1.197		
7800.325	-1.896		

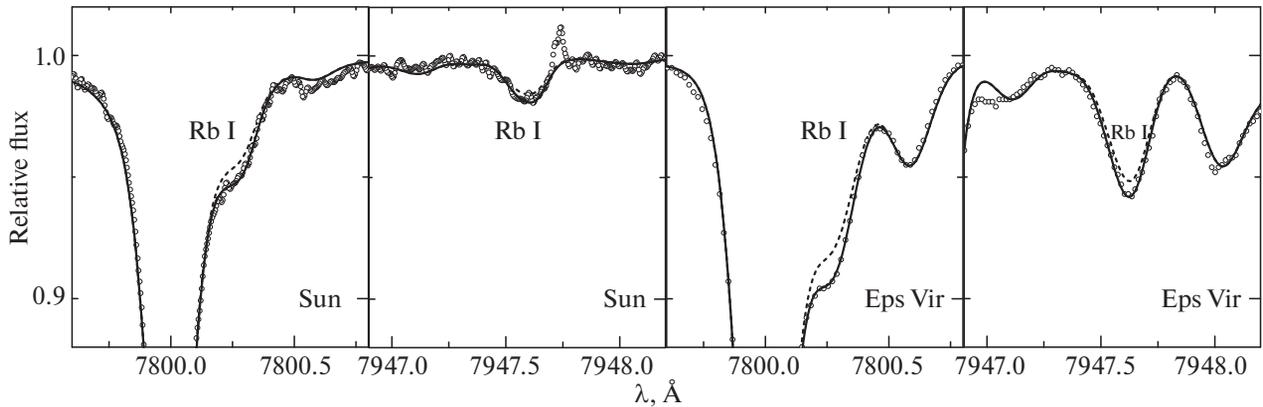


Рис. 2. Линии рубидия в спектре Солнца и ϵ Vir ($T_{\text{eff}} = 4983$ К, $\log g = 2.77$). Наблюдения обозначены открытыми кружками. НеЛТР расчеты показаны сплошной линией, а ЛТР-профили для того же содержания — штриховой линией.

$= 2.36 \pm 0.03$, получаемого из анализа метеоритов (Лоддерс, 2019).

Наши расчеты с применением созданной модели атома при использовании этих же величин эквивалентных ширин линий позволили получить неЛТР содержание рубидия (Rb/H) = 2.40 для линии 7800 Å и 2.30 для линии 7947 Å. Среднее содержание рубидия в солнечной атмосфере (Rb/H) = 2.35 ± 0.05 . Это значение практически совпадает с метеоритным. В то же время полученное нами содержание при ЛТР-подходе (Rb/H) = 2.47 ± 0.05 хорошо согласуется с результатами Гривесс и др. (2015).

Профили сравнения наблюдаемого и синтетического спектров даны на двух левых панелях рис. 2. Использован атлас Солнца Веллес и др. (2011), так как в нем линия 7947 Å наиболее хорошо очищена от линий земной атмосферы. Псевдоэмиссия, видимая в правом крыле этой линии на рисунке, — это артефакт чистки спектра от теллурических линий. Видно, что линии рубидия в спектре Солнца хорошо описываются синтетическим спектром с уч-

том отклонений от ЛТР при принятом содержании (Rb/H) = 2.35 для обеих линий.

Видно, что отклонения от ЛТР приводят к усилению резонансных линий рубидия в спектре Солнца. Это связано с перенаселением основного уровня атома рубидия в области образования резонансных линий, обусловленным процессами так называемой сверхрекомбинации. На рис. 3 представлено распределение b -факторов наиболее важных уровней рубидия по глубине Солнечной фотосферы. Перенаселение основного уровня 5s наступает на глубинах выше $\tau_{5000} = +0.4$. Уровни 5p также перенаселены, но в меньшей степени. При этом степени отклонения от ЛТР для подуровней 5p $^2P_{1/2}$ и 5p $^2P_{3/2}$ практически совпадают, за исключением самых верхних слоев фотосферы. На рисунке также показано распределение b -факторов для нескольких возбужденных уровней. Видно, что населенность остальных уровней Rb I не сильно отличается от термодинамически-равновесной. Эффективная глубина образования ядер резонансных линий рубидия обозначена стрелочкой. Из-за того что содержание элемента очень маленькое, линии слабые и образуются в глубине фотосферы. Но при этом на протяжении всей глубины формирования линии сохраняется перенаселенность нижнего уровня, и ее степень больше, чем верхнего, что ведет к усилению линий. НеЛТР поправка, т.е. разница между неЛТР и ЛТР содержанием рубидия, для Солнца составляет -0.12 dex.

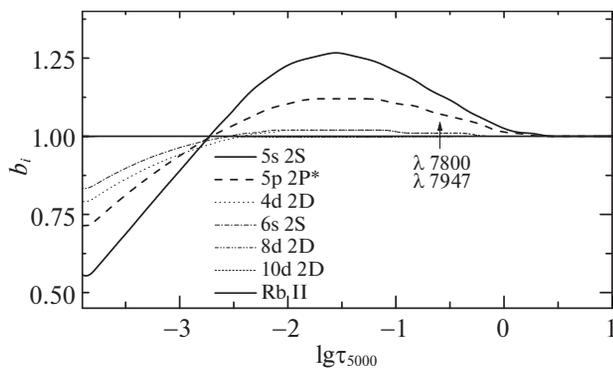


Рис. 3. Поведение b -факторов отдельных уровней атома рубидия в фотосфере Солнца. Стрелочкой обозначена глубина формирования излучения в ядрах резонансных линий Rb I.

ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ЛТР ДЛЯ Rb I В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД РАЗНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

С помощью предложенной модели атома мы рассчитали сетку неЛТР поправок для резонансных линий рубидия в звездных атмосферах в диапазоне параметров: T_{eff} от 3500 до 6500 К, $\log g$ от 1.0 до 5.0, $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -1.0 до $+0.5$, $V_t = 1.0$ км/с

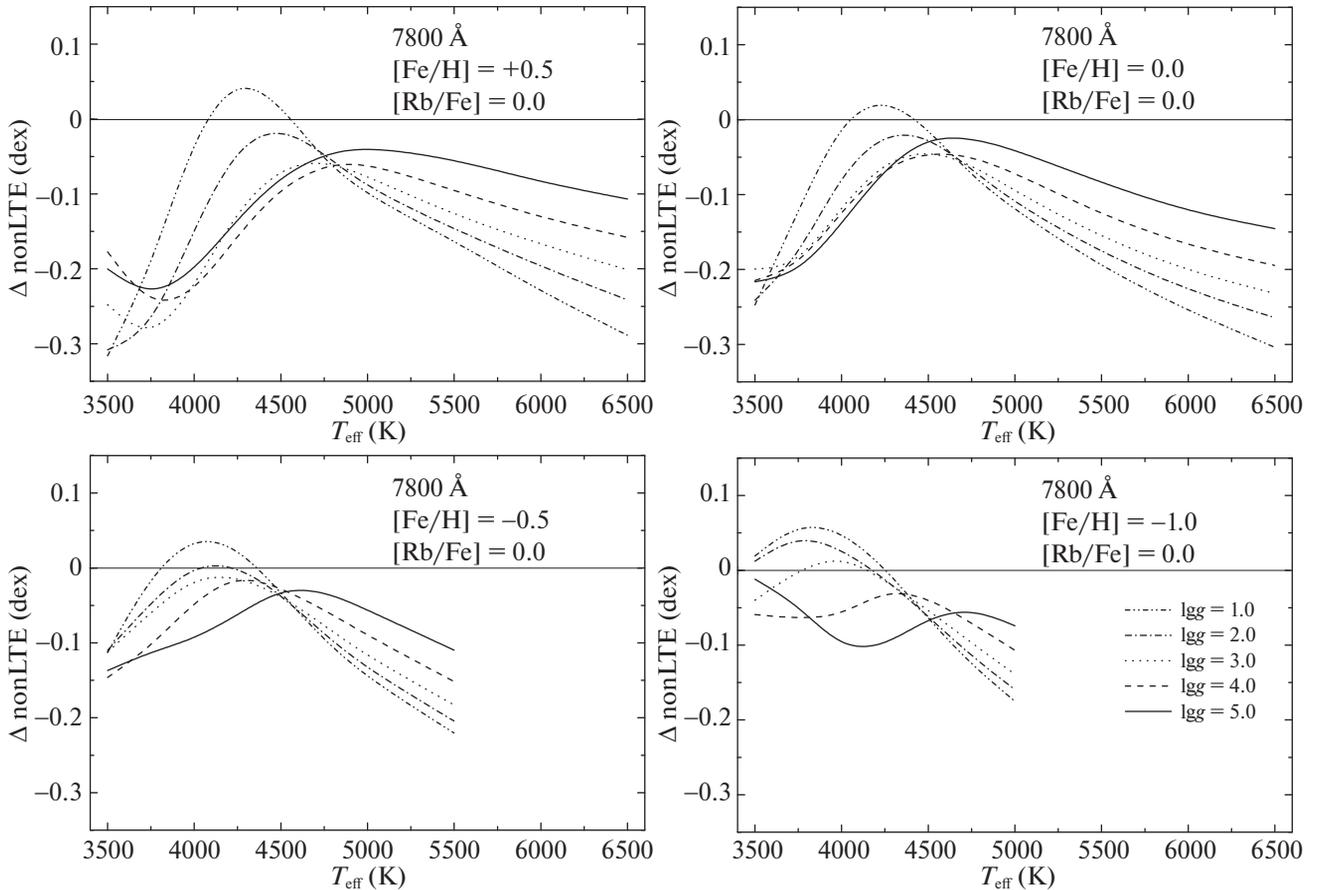


Рис. 4. Сетка неЛТР поправок $\Delta \text{nonLTE} = \lg \varepsilon_{\text{nonLTE}} - \lg \varepsilon_{\text{LTE}}$ (где $\varepsilon_{\text{nonLTE}}$ и ε_{LTE} — содержания рубидия, полученные для одинаковой эквивалентной ширины линии при неЛТР и ЛТР подходе) для резонансной линии рубидия λ 7800 Å в звездных атмосферах при $[\text{Rb}/\text{Fe}] = 0.0$ в диапазоне параметров: T_{eff} от 3500 до 6500 К, $\log g$ от 1.0 до 5.0, $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -1.0 до $+0.5$, $V_t = 1.0$ км/с.

и относительным содержанием рубидия $[\text{Rb}/\text{Fe}] = 0.0$. Зависимость неЛТР-поправок от звездных параметров для линии λ 7800 Å приведена на рис. 4. Эквивалентная величина линии при построении сетки была ограничена снизу величиной $EW \geq 2.0$ мÅ, так как более слабые линии в спектрах звезд обычно неизмеряемы из-за шумов. Поправки другой резонансной линии рубидия, как правило, немного меньше по абсолютной величине. Причина в том, что эта линия слабее и образуется глубже в фотосфере, где выше концентрация частиц, соударения с которыми уменьшают отклонения от ЛТР.

Отметим, что величина неЛТР поправок сильно зависит от величины микротурбулентной скорости и от содержания элемента, так как от этого зависит интенсивность спектральной линии и, соответственно, глубина ее образования. На рис. 5 можно видеть, как меняется вид зависимости неЛТР поправок от эффективной температуры при изменении относительного содержания рубидия $[\text{Rb}/\text{H}]$ от -0.4 до $+0.4$ dex. Поэтому надо учитывать, что приводимые здесь величины неЛТР поправок

носят справочный характер. Для точного учета влияния отклонения от ЛТР на содержание рубидия следует проводить индивидуальные расчеты.

Как мы уже отмечали ранее, величина неЛТР-поправок для звезд-карликов критически зависит от учета ударных взаимодействий с атомами водорода. Это хорошо видно на рис. 6, где приведены рассчитанные неЛТР-поправки для звезд солнечной металличности с использованием детальных квантовомеханических расчетов Яковлевой и др. (2018) (левая панель) и при использовании для всех переходов теоретического приближения Дравина (1969) (правая панель).

Процессы, приводящие к перенаселению нижних уровней, между которыми образуются интересные нас линии, характерны для других щелочных металлов (Na I, K I) и подробно описаны в работах Брулс и др. (1992), Машонкиной и др. (2000), Ивановой и Шиманского (2000). На установление статистического равновесия в атоме рубидия влияет множество процессов: фотоионизация, зависящая от сечения фотоионизации и распределения интенсивности излучения по глубине фотосферы

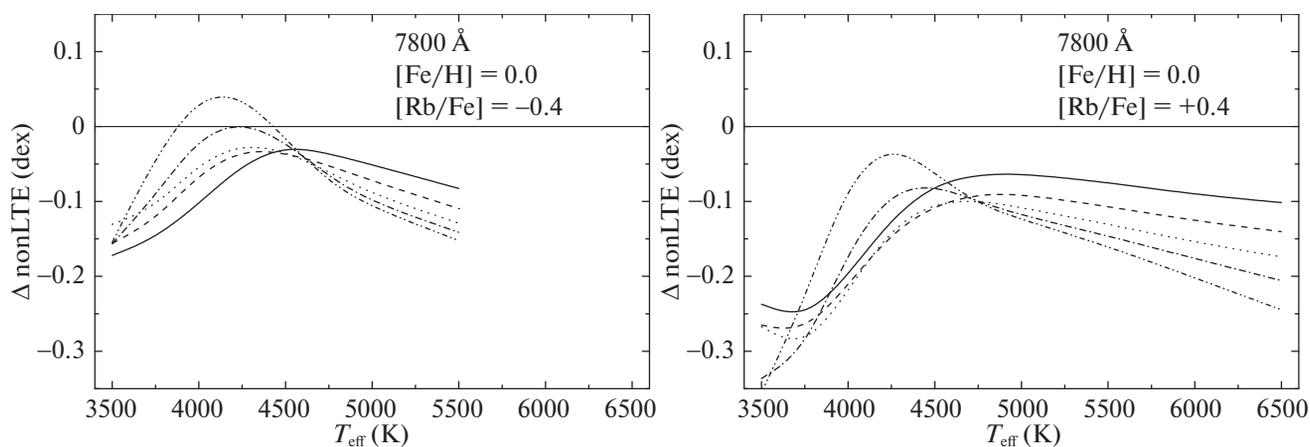


Рис. 5. Сетка неЛТР поправок для резонансной линии рубидия λ 7800 Å для двух значений содержания рубидия $[\text{Rb}/\text{Fe}] = -0.4$ и $[\text{Rb}/\text{Fe}] = +0.4$. Диапазон параметров тот же, что и на рис. 4.

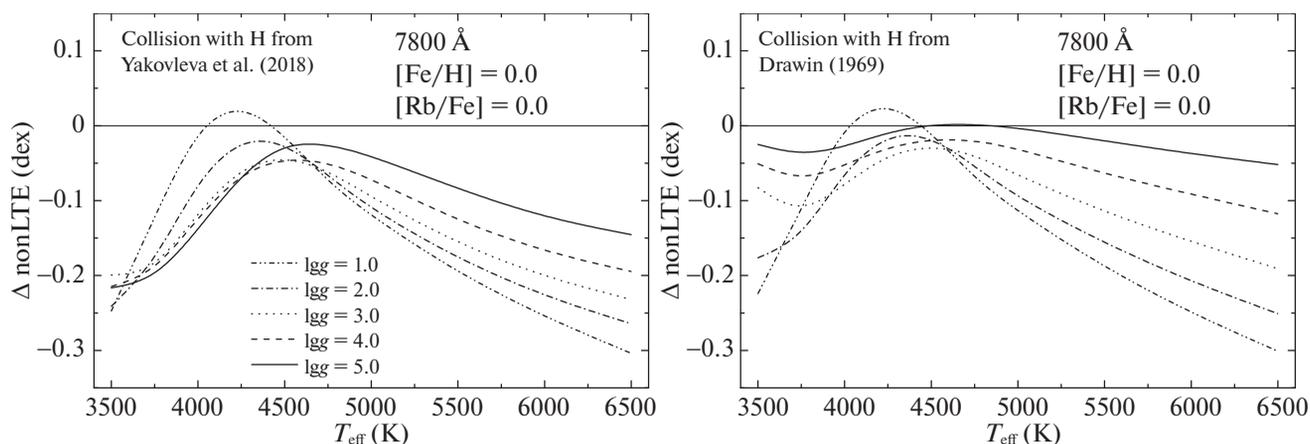


Рис. 6. Сетка неЛТР поправок для резонансной линии рубидия λ 7800 Å для звезд солнечной металличности с использованием детальных квантовомеханических расчетов Яковлевой и др. (2018) (левая панель) и при использовании для всех переходов теоретического приближения Дравина (1969) (правая панель). Диапазон параметров тот же, что и на рис. 4.

и длине волны; рекомбинация на возбужденные уровни и последующие каскадные переходы на менее возбужденные состояния; поглощение фотонов в ядре линии и выход фотонов с той же глубины в крыльях этой линии; скорости ударных процессов с электронами и водородом, находящиеся в зависимости от концентрации частиц и локальной температуры и т.д. Все эти процессы взаимосвязаны и конкурируют друг с другом. Определить, как сложится баланс между этими процессами для конкретной модели фотосферы, можно только путем численного моделирования. Основные же тенденции можно описать следующим образом. Как мы уже упоминали, сечение фотоионизации основного уровня атома рубидия имеет очень малую величину. Пороги фотоионизации остальных уровней лежат в красной и ИК-областях спектра. Поэтому ультрафиолетовое излучение в спектре звезды практически не оказывает влияния на скорость

фотоионизации. При этом в ИК-диапазоне величина средней интенсивности, которая определяет скорость фотоионизации, меньше локального значения функции Планка, задающей скорость фоторекомбинации. Рубидий, в свою очередь, находится на 99 и более процентов в ионизованном состоянии. Таким образом, ион рубидия представляет собой неиссякаемый резервуар для фоторекомбинаций.

Основные линии рубидия также лежат преимущественно в ИК-диапазоне, для которого характерно превышение скоростей девозбуждения над фотовозбуждениями. Все это приводит к “сверхрекомбинации” и перенаселяет нижние уровни рубидия в области образования резонансных линий. Линии рубидия усиливаются, как было показано на примере спектра Солнца. Усиление линий из-за неЛТР эффектов еще заметнее для звезд с более низкой температурой — на двух правых панелях рис. 2 приведены примеры сравнения наблюдае-

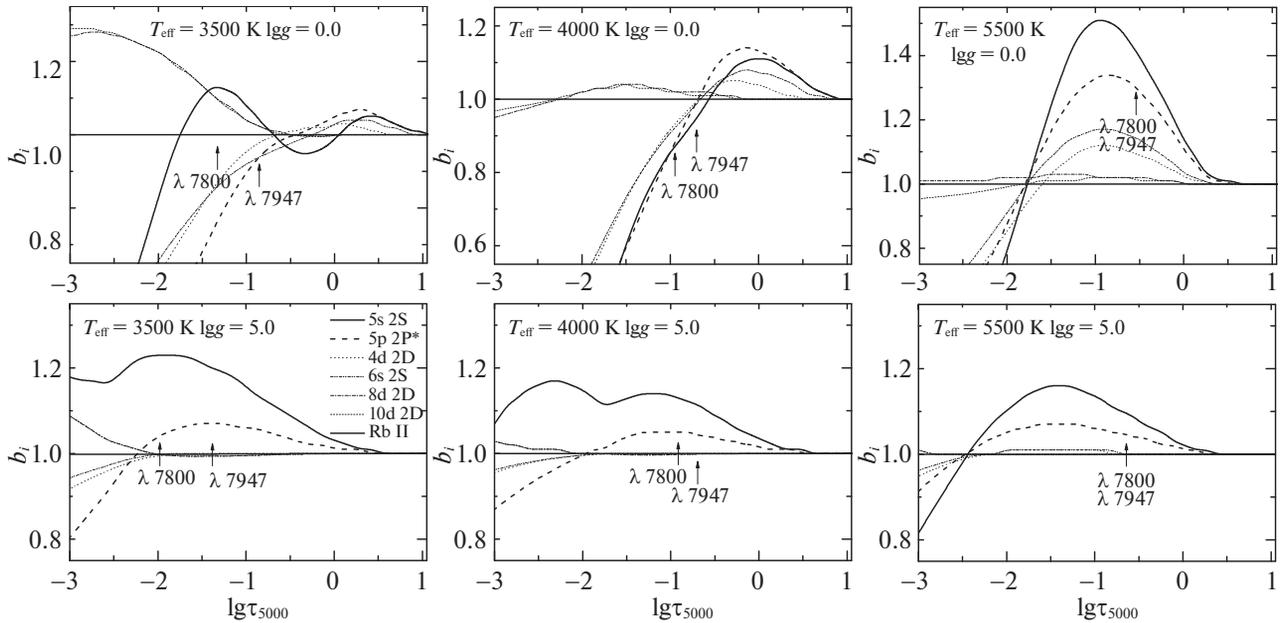


Рис. 7. Распределение b -факторов отдельных уровней атома рубидия по глубине фотосферы у звезд-гигантов (верхний ряд) и карликов (нижний ряд). Стрелочками обозначены глубины формирования излучения в ядрах резонансных линий Rb I.

мого спектра звезды ϵ Девы ($T_{\text{eff}} = 4983$ K, $\log g = 2.77$) с синтетическим спектром, рассчитанным в ЛТР и неЛТР подходе для содержания рубидия $(\text{Rb}/\text{H}) = 2.31$. Величина неЛТР-поправки для этой звезды -0.10 dex.

При понижении температуры возрастает роль столкновений с водородом, и абсолютная величина поправок уменьшается. В области эффективных температур ≈ 4500 K она минимальна. На это накладываеся влияние изменения распределения средней интенсивности излучения от длины волны и глубины в звездной атмосфере, которое влияет на эффективность “сверхрекомбинации”. В частности, для звезд-гигантов степень перенаселенности основного уровня рубидия становится несколько меньше, чем у уровня $5p^2P^{\circ}$, что приводит к ослаблению резонансных линий. НеЛТР-поправки у гигантов и сверхгигантов при эффективных температурах около 4200 K или близки к нулю, или даже меняют знак. Однако при более низких температурах увеличивается доля нейтральных атомов рубидия, и резонансные линии начинают быстро усиливаться. У звезд с солнечной металличностью и $T_{\text{eff}} < 4000$ K эквивалентные ширины исследуемых линий превышают 100 мÅ. Более сильные линии образуются в более высоких слоях атмосферы, где величина b -фактора основного уровня выше, чем у верхнего уровня резонансных линий. Абсолютная величина неЛТР-поправок опять возрастает. Это можно видеть на рис. 7, где приведены распределение b -факторов по глубине фотосферы для гигантов и карликов с температурами 3500, 4000 и 5500 K.

Стрелочками обозначены эффективные глубины образования ядер резонансных линий рубидия.

Мы ограничили наше исследование звездами с эффективными температурами 3500 K из-за пределов используемого нами блока непрозрачностей. Из рассчитанной сетки неЛТР-поправок видно, что использование классического ЛТР-подхода к определению содержания рубидия может приводить к систематическим ошибкам. При T_{eff} в диапазоне температур 4000–4500 K, особенно для звезд-гигантов, влияние неЛТР-эффектов относительно невелико, однако вне этого температурного диапазона ошибки в определении содержания могут достигать 0.30 dex.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами построена модель атома рубидия, включающая 29 уровней Rb I и основной уровень Rb II. Выполнены неЛТР вычисления для сетки моделей атмосфер с T_{eff} от 3500 до 6500 K, $\log g$ от 1.0 до 5.0, $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -1.0 до $+0.5$, $V_t = 1.0$ км/с и с относительным содержанием рубидия $[\text{Rb}/\text{Fe}] = 0.0$. Показано, что не учет влияния эффектов отклонения от ЛТР может приводить к значительным ошибкам в определении содержания этого элемента. Ошибка может достигать 0.3 dex. При этом величина неЛТР-поправок для звезд-карликов с эффективными температурами ниже 4000 K критически зависит от учета ударных взаимодействий с атомами водорода. Различие в содержании рубидия при использовании детальных квантовомеханических расчетов и теоретического приближения

Дравина может достигать 0.17 dex. По линиям в спектре Солнца определено содержание рубидия (Rb/H) = 2.35 ± 0.05 , которое практически совпадает с содержанием рубидия, получаемым из анализа метеоритов (Rb/H) = 2.36 ± 0.03 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен (C.W. Allen), *Astrophysical Quantities*, London: Athlone Press (1973).
2. Андриевский и др. (S.M. Andrievsky, M. Spite, S.A. Korotin, F. Spite, P. Bonifacio, and R. Cayrel, P. François, V. Hill), *Astron. Astrophys.* **509**, A88 (2010).
3. Брулс и др. (J.H.M.J. Bruls, R.J. Rutten, and N.G. Shchukina), *Astron. Astrophys.* **265**, 237 (1992).
4. Л.А. Вайнштейн, И.И. Собельман, Е.А. Юков, *Возбуждение атомов и уширение спектральных линий* (М.: Наука, 1979).
5. Варнер (B. Warner), *MNRAS* **139**, 115 (1968).
6. Веллес и др. (L. Wallace, K.H. Hinkle, W.C. Livingston, and S.P. Davis), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **195**, id:6 (2011).
7. Виз и др. (W. L. Wiese, M. W. Smith, B. M. Miles), *Atomic transition probabilities. Sodium through Calcium. A critical data compilation*, NSRDS-NBS **2** (1969).
8. Виз, Мартин (W.L. Wiese and G.A. Martin), *Wavelengths and transition probabilities for atoms and atomic ions: Part 2. Transition probabilities*, NSRDS-NBS **68** (1980).
9. Вондергольд и др. (D. von der Goltz, W. Hansen, and J. Richter), *Phys. Scr.* **30**, 244 (1984).
10. Гарсия-Хернандес и др. (D.A. García-Hernández, P. García-Lario, B. Plez, F. D'Antona, A. Manchado, J.M. Trigo-Rodríguez), *Science* **314**, 1751 (2006).
11. Гривес и др. (N. Grevesse, P. Scott, M. Asplund, and A.J. Sauval), *Astron. Astrophys.* **573**, A27 (2015).
12. Дравин (H.W. Drawin), *Z. Physik* **225**, 483 (1969).
13. Жанг и др. (H.W. Zhang, K. Butler, T. Gehren, J.R. Shi, and G. Zhao), *Astron. Astrophys.* **453**, 723 (2006).
14. Иванова Д.В., Шиманский В.В., *Астрон. журн.* **77**, 432 (2000).
15. Каstellи, Куруц (F. Castelli and R.L. Kurucz), *Modelling of Stellar Atmospheres*, Proc. 210th Symp. IAU, Uppsala, Sweden, 17–21 June, 2002. Ed. N. Piskunov, W.W. Weiss, D.F. Gray. Publ. IAU Astr. Soc. Pac., A20 (2003).
16. Каракас, Латтанзио (A.I. Karakas and J. C. Lattanzio), *Publ. Astron. Soc. Austral.* **31**, e030 (2014).
17. Карлссон (M. Carlsson), *Uppsala Astron. Observ. Publ.* **33** (1986).
18. Кован и др. (J.J. Cowan, C. Sneden, J.E. Lawler, A. Aghamian, M. Wiescher, K. Langanke, G. Martínez-Pinedo, F.K. Thielemann), arXiv:1901.01410 (2019).
19. Коротин и др. (S.A. Korotin, S.M. Andrievsky, and R.E. Luck), *Astron. Astrophys.* **351**, 168 (1999).
20. Кристалло и др. (S. Cristallo, L. Piersanti, O. Straniero, R. Gallino, I. Domínguez, C. Abia, G. Di Rico, M. Quintini, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **197**, 17 (2011).
21. Лимонжи, Чиеффи (M. Limongi and A. Chieffi), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **237**, 13 (2018).
22. Лоддерс (K. Lodders), arXiv:1912.00844 (2019).
23. Марр, Крик (G.V. Marr and D.M. Creek), *Proc. Royal Soc. London Ser. A* **304**, 233 (1968).
24. Машонкина Л.И., Шиманский В.В. Сахибуллин Н.А., *Астрон. журн.* **77**, 893 (2000).
25. Месзарос и др. (Sz. Mészáros, C. Allende Prieto, B. Edvardsson, F. Castelli, A.E. Garcia Perez, B. Gustafsson, S.R. Majewski, B. Plez, et al.), *Astron. J.* **144**, 120 (2012).
26. Мортон (D.C. Morton), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **130**, 403 (2000).
27. Парк (C. Park), *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.* **11**, 7 (1971).
28. Пранзос и др. (N. Prantzos, C. Abia, M. Limongi, A. Chieffi, and S. Cristallo), *MNRAS* **476**, 3432 (2018).
29. Пранзос и др. (N. Prantzos, C. Abia, S. Cristallo, M. Limongi, and A. Chieffi), *MNRAS* **491**, 1832 (2020).
30. Режемортрер (H. van Regemorter), *Astrophys. J.* **136**, 906 (1962).
31. Рябчикова и др. (T. Ryabchikova, N. Piskunov, R.L. Kurucz, H.C. Stempels, U. Heiter, Yu. Pakhomov, and P.S. Barklem), *Phys. Scr.* **90**, id:054005 (2015).
32. Сансонетти (J.E. Sansonetti), *J. Phys. and Chem. Ref. Data* **35**, 301 (2006).
33. Ситон (M.J. Seaton), *Atomic and Molecular Processes* (Ed. Bates, Acad. Press, New York, 1962).
34. Снеден и др. (C. Sneden, J.J. Cowan, and R. Gallino), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **46**, 241 (2008).
35. Стинбок, Холвегер (W. Steenbock and H. Holweger), *Astron. Astrophys.* **130**, 319 (1984).
36. Тилеман и др. (F.K. Thielemann, M. Eichler, I.V. Panov, and B. Wehmeyer), *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **67**, 253 (2017).
37. Томкин, Ламберт (J. Tomkin and D.L. Lambert), *Astrophys. J.* **523**, 234 (1999).
38. Травальо и др. (C. Travaglio, D. Galli, R. Gallino, M. Busso, F. Ferrini, and O. Straniero), *Astrophys. J.* **521**, 691 (1999).
39. Хофсаецс (D. Hofsaess), *Z. Physik A* **281**, 1 (1977).
40. Цымбал (V.V. Tsymbal), *ASP Conf. Ser.* **108**, 198 (1996).
41. Шейделамма и др. (J. Shejeelammal, A. Goswami., P.P. Goswami, R.S. Rathour, and T. Masseron), *MNRAS* **492**, 3708 (2020).
42. Яковлева и др. (S.A. Yakovleva, P.S. Barklem, and A.K. Belyaev), *MNRAS* **473**, 3810 (2018).