

УДК 523.94—645

## Эффекты отклонения от локально-термодинамического равновесия во фраунгоферовом спектре Солнца. Резонансная линия К I $\lambda$ 769.9 нм

Н. Г. Щукина

Рассматривается образование резонансной линии нейтрального калия К I  $\lambda$  769.9 нм (с учетом отклонения от ЛТР), наблюдаемой в спектре невозмущенных областей на диске Солнца. Получены коэффициенты отклонения от ЛТР населенностей шести уровней К I. Оценены не-ЛТР эффекты для функции источника и профиля  $\lambda$  769.9 нм при различных положениях на диске Солнца. Проанализирована чувствительность найденного решения к следующим параметрам не-ЛТР синтеза: многоуровневая структура; сечения фотоионизации субординатных уровней; температура солнечной атмосферы; содержание калия; методы расчета средней интенсивности излучения в свободно-связанном континууме. Показано, что теоретические изменения от центра к краю центральной остаточной интенсивности и профиля  $\lambda$  769.9 нм, вычисленные с учетом отклонения от ЛТР, хорошо согласуются с наблюдениями. Сделан вывод, что к этой резонансной линии К I гипотеза об ЛТР не применима. Содержание калия на Солнце, уточненное при не-ЛТР синтезе профиля  $\lambda$  769.9 нм, равно  $\lg A(K) = 5.08 \pm 0.1$ .

*THE EFFECTS OF DEPARTURE FROM THE LOCAL THERMODYNAMICAL EQUILIBRIUM IN THE SOLAR FRAUNHOFER SPECTRUM. K I RESONANCE LINE  $\lambda$  769.9 nm, by Shchukina N. G.* — Non-LTE formation of the K I resonance line  $\lambda$  769.9 nm observed in the spectrum of quiet regions on the solar disk is discussed. Departure from LTE coefficients for six levels of K I are obtained. Non-LTE effects in the line source function and centre-to-limb profiles are evaluated. The influence of some parameters on the solution is analysed. Those parameters are: multilevel structure of the atom; photoionization cross-sections from subordinate K I levels; temperature of the solar atmosphere; abundance of potassium; methods of calculation of mean intensity in bound-free continuum. Centre-to-limb variations of theoretical residual central intensity and profile of  $\lambda$  769.9 nm are in close agreement with observations. A conclusion is made that LTE-assumption is not valid for K I resonance line. The improved abundance of potassium is  $\lg A(K) = 5.08 \pm 0.1$ .

**Введение.** Линии нейтрального калия представляют интерес для исследования физических условий в атмосферах Солнца и звезд. Линии К I  $\lambda$  404.4 нм и  $\lambda$  404.7 нм служат чувствительными индикаторами температуры в звездах класса М. Анализ смещения и асимметрии резонансной линии К I  $\lambda$  769.9 нм [2, 12, 22, 24] используется при исследовании солнечных осцилляций и неразрешенного поля скоростей. Эта линия отличается повышенной чувствительностью к температуре [21].

При зондировании физического состояния атмосфер Солнца и звезд необходимо знать, насколько образование линий К I чувствительно к отклонению от локально-термодинамического равновесия в их атмосферах. В случае звезд поздних спектральных классов этот вопрос рассматривался в [10, 17]. Найдено, что влияние отклонения от ЛТР на характеристики линий К I значительно. Исследование солнечного линейчатого спектра нейтрального калия методом не-ЛТР синтеза, предпринятое в [21], показало, что наблюдаемое поведение профилей линий К I вдоль диска Солнца можно объяснить, лишь предположив для них отклонение от ЛТР. Несмотря на имеющиеся литературные данные, некоторые вопросы не-ЛТР образования линий К I в атмосферах звезд и Солнца остаются нерешенными. Одна из целей данной работы — получить количественные оценки влияния отклонения от ЛТР на населенности многоуровневой модели атома К I, функцию источника и профиль солнечной

резонансной линии К I  $\lambda$  769.9 нм, наблюдаемой в спектре невозмущенных областей на диске Солнца. Вторая цель — проанализировать чувствительность полученного решения к некоторым параметрам не-ЛТР синтеза. Кроме того, попытаемся уточнить содержание калия на Солнце.

**Метод решения.** Для выполнения поставленных целей мы провели не-ЛТР синтез линейчатого спектра калия в приближении однородной плоскопараллельной модели солнечной атмосферы в предположении полного перераспределения излучения в линиях и независимости коэффициентов излучения и поглощения от направления. В этом случае не-ЛТР синтез сводится к решению совместной системы уравнений переноса излучения, стационарности и сохранения частиц для заданной многоуровневой модели атома. Указанная система решалась методом квазилинеаризации [8, 9] с использованием программы, созданной в отделе физики Солнца Главной астрономической обсерватории АН УССР для вычислений на ЭВМ типа ЕС.

Средняя интенсивность излучения ( $J$ ) переходов, в которых важны эффекты радиативной взаимосвязи («основные» переходы), находилась из решения линеаризуемой системы уравнений переноса для данных переходов, уравнений стационарности для всех уровней исследуемой модели атома и уравнения сохранения частиц. Метод позволяет найти одновременно и населенности уровней при условии, что будут известны скорости возбуждения (и ионизации) излучением во «вспомогательных» переходах, входящие в уравнения стационарности. Под «вспомогательными» подразумеваются переходы, поле излучения которых слабо зависит от поля излучения других переходов (в этом случае говорят, что переходы радиативно не взаимосвязаны).

Среднюю интенсивность излучения «вспомогательных» переходов мы определяли, решая уравнения переноса излучения по схеме [14] (так называемое «двухуровневое приближение»).

Населенности  $n_i$  уровней исследуемой модели атома и средние интенсивности излучения в линиях для различных глубин  $m$  в атмосфере, полученные в результате вышеописанной процедуры, позволяют найти функции источника в линиях  $S^L$ , их профили  $r_\lambda(\mu)$  и центральные остаточные интенсивности  $r_0(\mu)$  при различных положениях  $\mu = \cos \theta$  на диске Солнца ( $m$  — масса столбика атмосферы сечением  $1 \text{ см}^2$  над данной глубиной). Коэффициенты отклонения от ЛТР  $b_i$  населенностей уровней исследуемого атома определялись из соотношения:  $b_i = n_i(\text{не-ЛТР})/n_i(\text{ЛТР})$ . Более подробно метод решения описан нами в [5, 7].

**Данные для вычислений.** Модель атома калия включала семь уровней (рис. 1). Процессами, управляющими заселением уровней являлись: фотоионизация и ионизация электронным ударом со всех рассмотренных уровней атома; фоторекомбинация и тройная рекомбинация; спонтанные переходы и переходы под действием излучения между уровнями, приведенными на рис. 1; переходы между всеми уровнями под действием столкновений с электронами. Предполагалось, что переход между подуровнями 2, 3 тонкой структуры уровня  $4^2P^0$  находится в детальном балансе. Радиативные переходы в линиях рассматривались как «основные». Все связанно-свободные переходы и запрещенный переход 1—5 — как «вспомогательные».

**Функция Фойгта.** При расчете атомных коэффициентов поглощения в линиях использовался фойгтовский профиль. Способ его определения подробно описан в [5].

**Постоянная затухания.** В солнечной атмосфере основным механизмом, обуславливающим эффект затухания, является ван-дер-ваальсово взаимодействие с атомами водорода и гелия с постоянной  $\gamma_6$  [18]. Расчет проводился по формуле Унзольда [25]. При синтезе профиля линии  $\lambda$  769.9 нм для лучшего согласия с наблюдениями  $\gamma_6$  умножалась на коэффициент  $E$ . Исследование влияния значения  $E$  на вычисление это-

го профиля дало следующие пределы его изменения:  $E=1.2-1.5$  для центра ( $\mu=1$ ) и для края ( $\mu=0.28$ ) диска Солнца.

*Силы осцилляторов  $f_{lu}$ .* Данные для  $f_{lu}$  взяты из [26].

*Сечения фотоионизации* с основного уровня использовались, согласно [21], а именно бралось среднее из трех экспериментальных кривых [19]. Экспериментальные данные для сечений ионизации с других уровней отсутствуют. Современная теория предоставляет возможность вычислять эти сечения или в водородоподобном приближении или мето-

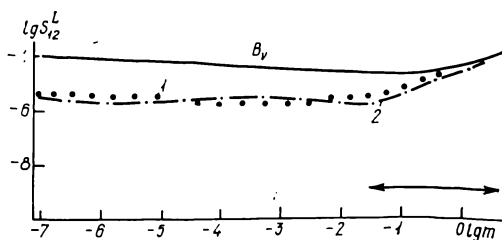
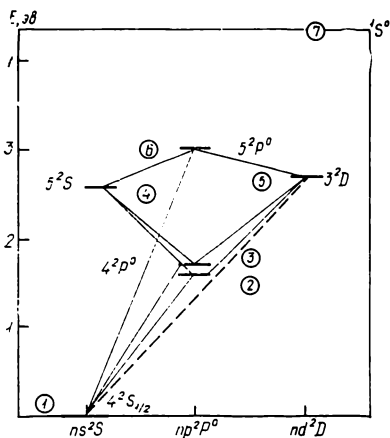


Рис. 1. Диаграмма термов атома калия. Сплошная линия — «основные» переходы; штриховая — «вспомогательные». Цифры в кружочках — номера уровней

Рис. 2. Функция источника  $S_{12}^L$  в линии  $\lambda$  769.9 нм для четырех- (1) и семиуровневой (2) модели атома К I.  $B_\nu$  — функция Планка. Стрелками обозначена область образования линии  $\lambda$  769.9 нм (согласно [21]). Модель атмосферы — HSRA. Горизонтальная ось — логарифмическая шкала масс

дом квантового дефекта [20]. Оба метода вызывают возражения. Первый — потому, что калий не относится к числу водородоподобных элементов. Второй — ненадежностью определения величины квантового дефекта. Кроме того, возможно, что для серии  $ns$  ненадежен сам метод квантового дефекта [13]. Указанные приближения применялись при исследовании влияния неопределенностей в сечениях фотоионизации с субординатных уровней на не-ЛТР синтез линии  $\lambda$  769.9 нм.

Сечения возбуждения электронным ударом для всех переходов (за исключением перехода 4—6) определялись на основе борн-кулоновского приближения с учетом нормировки [1], для перехода 4—6 — по модифицированному методу Борна. Сечения ионизации электронным ударом с основного уровня рассчитывались также с помощью борн-кулоновского приближения [1], с других уровней — по формуле Ситона [23].

*Коэффициент поглощения в континууме.* В данной работе исследованы следующие источники непрерывного поглощения: H, Si I, C I, Mg I, Al I, Fe I; томсоновское рассеяние на электронах; рэлеевское рассеяние на атомах водорода. Методика вычисления непрерывного коэффициента поглощения приведена в [5].

*Модели атмосферы.* Расчеты проводились в рамках модели атмосферы Солнца HSRA [15] и модели Эйреса — Лински [11]. Модели микро- ( $v_{\text{микро}}$ ) и макротурбулентной ( $v_{\text{макро}}$ ) скоростей задавались. Исследование влияния  $v_{\text{микро}}$  и  $v_{\text{макро}}$  на профиль  $\lambda$  769.9 нм дало следующие пределы изменения этих величин:  $v_{\text{микро}} = 0-1$  км/с,  $v_{\text{макро}} = 1.8-2.0$  км/с для центра диска и 2.5 км/с — для края ( $\mu = 0.28$ ).

*Содержание калия.* Мы проводили вычисления со значением содержания  $\lg A(\text{K})$  калия, представляющим среднее из значений, полученных разными авторами и приведенных в работе [21]:  $\lg A(\text{K}) = 5.08$ . Для оценки влияния ошибки этой величины расчеты проводились при

разных значениях  $\lg A(K)$ . Они были заключены в интервале между минимальным значением  $\lg A(K) = 4.70$ , полученным в [16], и значением  $\lg A(K) = 5.14$ , найденным с помощью не-ЛТР синтеза профиля  $\lambda 769.9$  нм [21].

**Наблюдения.** Сравнение с наблюдениями проведено только для резонансной линии  $\lambda 769.9$  нм. Вторая резонансная линия  $\lambda 766.5$  нм блендирована теллурическими линиями  $O_2$ . Линия  $404.4$  нм — слаба и также блендирована. Наблюдения для остальных линий отсутствуют.

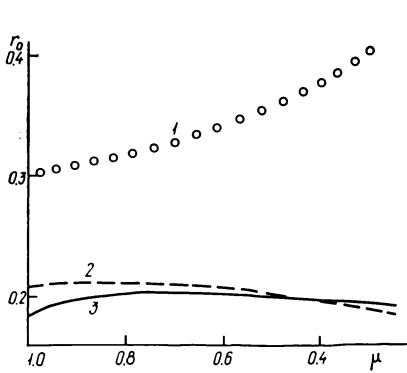


Рис. 3. Изменение центральной остаточной интенсивности линии  $\lambda 769.9$  нм К I при переходе от центра к краю солнечного диска: 1 — ЛТР расчеты; 2 — не-ЛТР расчеты; 3 — наблюдения

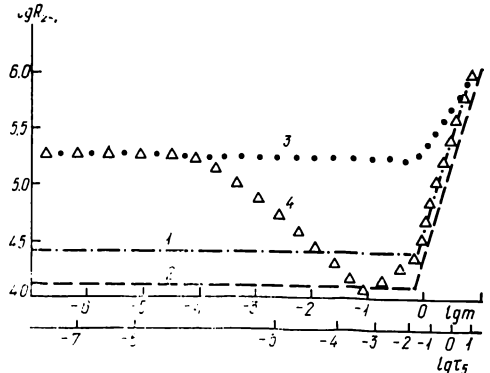


Рис. 4. Изменение с высотой скорости фотоионизации  $R_{27}$  со второго уровня  $4 2P_{1/2}^0$  для четырех аппроксимаций  $R_{27}$ . Вторая горизонтальная ось — логарифмическая шкала оптических глубин

Наблюдения линии  $\lambda 769.9$  нм выполнены нами на монохроматоре двойной дифракции ГАО АН УССР при пяти положениях на диске Солнца:  $\mu = 1.0, 0.8, 0.6, 0.44, 0.28$ . Основные характеристики прибора и методика наблюдений описаны в [3, 4]. При обработке материала и наблюдений проводились учет изменения прозрачности земной атмосферы, усреднение отдельных контуров, исправление за инструментальный профиль.

**Коэффициенты  $b_i$  и не-ЛТР эффекты в линии  $\lambda 769.9$  нм.** Коэффициенты отклонения от ЛТР  $b_i$  для первых шести уровней нейтрального калия, приведенных на рис. 1, для модели HSRA со значением содержания этого элемента  $\lg A(K) = 5.08$ , даны в таблице. При этом использовались водородоподобные сечения фотоионизации. Изменение с глубиной функции источника  $S_{12}^L$  линии  $\lambda 769.9$  нм представлено на рис. 2. Изменение центральной остаточной интенсивности этой линии по диску Солнца изображено на рис. 3 в виде зависимости  $r_0(\mu)$ . Анализ полученных результатов приводит к следующим выводам: 1. Для рассмотренных уровней К I отклонение населенностей от ЛТР-значений начинается с  $\tau_5 < 1$  ( $\tau_5$  — оптическая глубина на длине волны  $\lambda = 500$  нм). Основным уровнем оказывается перенасыщенным в хромосфере. В нижней фотосфере, области температурного минимума и верхней фотосфере ( $\lg \tau_5$  от  $-4.5$  до  $+0.4$ ) число атомов на возбужденных уровнях, по сравнению с ЛТР, уменьшается, достигая наименьшего значения в области температурного минимума. 2. В слоях, где формируется линия  $\lambda 769.9$  нм ( $\lg \tau_5$  от  $-4.5$  до  $-0.4$ ), ее функция источника  $S_{12}^L$  оказывается меньше функции Планка. Отношение  $S_{12}^L/B_\nu$  постепенно увеличивается от 0.3 при  $\lg \tau_5 = -4.5$  до 1 при  $\lg \tau_5 = -0.4$ . 3. Не-ЛТР расчеты резонансной линии  $\lambda 769.9$  нм для пяти положений на диске Солнца дают намного лучшее согласие с наблюдениями, чем ЛТР расчеты. Отличия между не-ЛТР и ЛТР профилем этой линии усиливаются при переходе от центра к краю диска. Так, если в центре диска отличия в  $r_0$  составляют примерно 20 %, то при  $\mu = 0.28$  — около 30 %.

## Коэффициенты отклонения от ЛТР шести уровней атома К I

$d$	$m$	$\tau_s$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
1	1.000—7	1.458—8	1.10+3	3.68+1	1.92+1	6.48+0	2.22+0	7.25+0
2	6.564—7	9.531—8	7.73+2	2.83+1	1.48+1	5.43+0	1.85+0	6.39+0
3	4.309—6	5.953—7	4.39+2	1.86+1	9.92+0	4.12+0	1.40+0	5.20+0
4	2.829—5	1.937—6	1.79+2	9.55+0	5.33+0	2.66+0	8.94—1	3.79+0
5	1.857—4	3.496—6	7.58+1	5.10+0	2.98+0	1.77+0	5.90—1	2.80+0
6	1.219—3	6.835—6	3.18+1	2.75+0	1.70+0	1.18+0	3.97—1	2.05+0
7	5.492—3	1.720—5	1.07+1	1.30+0	8.72—1	7.24—1	2.46—1	1.39+0
8	8.002—3	2.261—5	7.56+0	1.03+0	7.11—1	6.21—1	2.12—1	1.23+0
9	1.166—2	3.043—5	4.99+0	7.78—1	5.58—1	5.18—1	1.79—1	1.05+0
10	1.698—2	4.380—5	2.85+0	5.40—1	4.05—1	4.06—1	1.43—1	8.51—1
11	2.475—2	7.036—5	1.38+0	3.40—1	2.70—1	2.99—1	1.08—1	6.42—1
12	3.605—2	1.238—4	1.02+0	2.91—1	2.43—1	2.66—1	1.00—1	5.50—1
13	5.253—2	2.275—4	1.00+0	3.09—1	2.76—1	2.74—1	1.09—1	5.10—1
14	7.653—2	4.272—4	1.02+0	3.44—1	3.32—1	2.92—1	1.24—1	4.73—1
15	1.115—1	8.146—4	9.85—1	3.79—1	3.97—1	3.08—1	1.45—1	4.30—1
16	1.624—1	1.572—3	9.12—1	4.16—1	4.66—1	3.26—1	1.74—1	3.96—1
17	2.367—1	3.058—3	8.74—1	4.73—1	5.51—1	3.58—1	2.21—1	3.86—1
18	3.448—1	5.970—3	8.03—1	5.25—1	6.14—1	3.90—1	2.83—1	3.94—1
19	5.024—1	1.170—2	7.71—1	5.93—1	6.72—1	4.41—1	3.72—1	4.33—1
20	7.319—1	2.296—2	7.63—1	6.68—1	7.15—1	5.11—1	4.83—1	5.01—1
21	1.066+0	4.517—2	8.33—1	7.73—1	7.96—1	6.26—1	6.27—1	6.17—1
22	1.554+0	8.922—2	9.13—1	8.71—1	8.77—1	7.64—1	7.76—1	7.58—1
23	2.263+0	1.792—1	9.86—1	9.60—1	9.72—1	9.01—1	9.09—1	8.98—1
24	3.298+0	3.847—1	1.02+0	1.02+0	1.02+0	9.90—1	9.92—1	9.88—1
25	4.804+0	1.052+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0	1.00+0

**Влияние параметров не-ЛТР синтеза на полученное решение.**

В данной работе мы провели анализ влияния на коэффициенты  $b_i$ , профиль резонансной линии  $\lambda$  769.9 нм и ее функцию источника  $S_{12}^L$  следующих параметров не-ЛТР синтеза спектра: количество уровней в модели атома калия; сечения фотоионизации с субординатных уровней: метод расчета средней интенсивности излучения в свободно-связанном континууме; содержание калия; распределение температуры в солнечной атмосфере.

*Роль многоуровневой структуры* мы оценили, сравнивая две модели атома калия. Первая состояла из семи уровней, во второй отсутствовали верхние уровни 4, 5, 6. Последняя представляет простейшую модель и соответствует модели, рассмотренной в [21]. Оказалось, что увеличение количества уровней с четырех до семи мало влияет на коэффициенты отклонения от ЛТР населенностей для первых двух уровней  $4^2S_{1/2}$  и  $4^2P_{1/2}^0$  (нижний и верхний уровни линии  $\lambda$  769.9 нм) и сильнее — для третьего. Коэффициент  $b_3$  возрастает при переходе от четырех- к семиуровневой модели примерно в два раза. Различия в профиле  $\lambda$  769.9 нм и ее функции источника для обоих случаев меньше 1%. Таким образом, эффекты радиативной взаимосвязи этой линии с «основными» линиями слабо влияют на ее излучение. При не-ЛТР синтезе резонансной линии  $\lambda$  769.9 нм достаточно пользоваться четырехуровневой моделью: первые три уровня из таблицы и основной уровень К II.

*Влияние фотоионизации.* При не-ЛТР синтезе населенности уровней атома и поле излучения линии зависят (в той или иной степени) от скоростей фотоионизации, входящих в уравнения стационарности. В данной работе мы рассмотрели влияние погрешностей в скоростях фотоионизации

$$R_{i7}(v, m) = \int_{v_{i7}}^{\infty} \sigma_{i7}(v) 4\pi J(v, m) dv/hv,$$

обусловленных погрешностями в сечениях фотоионизации  $\sigma_{l7}$  и средних интенсивностях излучения  $J(\nu, t)$  для связанно-свободных переходов с  $l$ -го уровня.

Погрешности в сечениях  $\sigma_{l7}$ , как отмечалось выше, вызваны трудностями их определения. Погрешности в  $J(\nu, t)$  связаны с методом расчета этой величины. Обычно средняя интенсивность излучения связанно-свободных переходов аппроксимируется планковской функцией с моделируемой температурой излучения  $T_r$ . Такой подход таит в себе несколько недостатков. В частности, он приводит к появлению зависящих от глубины дополнительных параметров (температур излучения для каждого связанно-свободного перехода) в многопараметрической задаче не-ЛТР синтеза спектра. Плохое знание  $T_r$  влечет за собой погрешности при определении  $R_{l7}$ , населенностей и, как следствие, при синтезировании профилей линий. В результате физические характеристики атмосферы, определенные с помощью таких профилей, могут оказаться ошибочными. Идеальным может быть случай, когда для нахождения  $J(\nu, t)$  в каждом  $l$ -континууме к линейризуемой системе уравнений переноса и стационарности подключались бы и уравнения переноса для этих континуумов. Однако такой подход приводит к резкому увеличению времени вычислений и требуемому объему внутренней и внешней памяти ЭВМ. Другой путь улучшения  $J(\nu, t)$  — решение уравнений переноса излучения для каждого связанно-свободного континуума методом Фотрие. Он позволяет довольно быстро и при малых затратах памяти ЭВМ найти  $J(\nu, t)$  независимо от линейризуемой системы уравнений. Исходя из сказанного, мы предприняли исследование влияния следующих аппроксимаций  $R_{l7}$ .

Аппроксимация 1. Сечения фотоионизации для субординатных уровней — водородоподобные. Средняя интенсивность  $J(\nu, t)$  определяется по методу Фотрие. Расчеты показали, что  $J(\nu, t)$  для связанно-свободных переходов с субординатных уровней калия лишь на несколько процентов отличаются от точных значений, находимых из линейризуемой системы уравнений стационарности и переноса излучения для линий и для континуумов.

Аппроксимация 2. Сечения  $\sigma_{l7}$  определяются методом квантового дефекта,  $J(\nu, t)$  — методом Фотрие.

Аппроксимация 3. Сечения  $\sigma_{l7}$  получены в водородоподобном приближении;  $J(\nu, t) = B_\nu(T_r)$ ,  $T_r = T_e$  — для фотосферы, вплоть до высоты, где  $T_e = T_b$ ;  $T_r = T_b$  — для хромосферы и области температурного минимума. Здесь  $T_e$  — электронная температура. Значения яркостных температур  $T_b$ , взятые из модели HSRA [15], для границ ионизации с субординатных уровней  $\nu_{l7}$  приведены нами в [6].

Аппроксимация 4.  $\sigma_{l7}$  — водородоподобные;  $J(\nu, t) = B_\nu(T_r)$ ,  $T_r = T_e$  — для фотосферы, области температурного минимума и нижней хромосферы, вплоть до высот, где  $T_e = T_b$ ;  $T_r = T_b$  в верхней части хромосферы.

Аппроксимации 1, 2 позволяют исследовать влияние на вычисление профиля  $\lambda$  769.9 нм методов расчета  $J(\nu, t)$ . Сравнение аппроксимаций 3 и 4 с первыми двумя дает возможность проанализировать влияние метода расчета средней интенсивности излучения в связанно-свободном континууме.

Изменение с глубиной в атмосфере Солнца скорости фотоионизации  $R_{l7}$  со второго уровня  $4\ 2P_{1/2}$  для указанных аппроксимаций представлено на рис. 4. Поведение  $R_{l7}$  других уровней аналогично. Профиль  $\lambda$  769.9 нм на лимбе Солнца для этих аппроксимаций, а также для ЛТР-случая и наблюдений изображен на рис. 5.

Анализ  $R_{l7}$  показывает, что поле излучения в связанно-свободных континуумах К I становится прозрачным, начиная с фотосферного слоя  $\lg \tau_{50} = -1.4$ . Это излучение, проникая во внешние (более холодные) слои, вызывает дополнительную ионизацию атомов с возбужденных

уровней. Именно этим, по-видимому, можно объяснить полученную нами в области температурного минимума и верхней фотосферы недонаселенность возбужденных уровней К I.

В глубоких слоях атмосферы Солнца вплоть до  $\tau_5 \approx 0.2$  поле излучения является планковским (рис. 4). В более высоких слоях представление  $J(\nu, t)$  функций Планка с  $T_r$ , зависящей от высоты только в фотосфере (аппроксимация 3), вызывает значительное отклонение от точного решения  $J(\nu, t)$ . Использование  $T_r$ , зависящей от высоты, и в

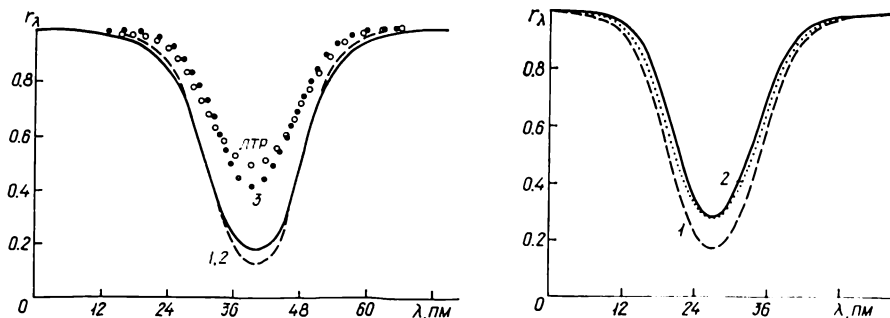


Рис. 5. Профиль резонансной линии  $\lambda$  769.9 нм К I вблизи лимба  $\mu=0.28$  для ЛТР-случая и трех аппроксимаций; сплошная линия — наблюдаемый профиль.  $E(\gamma_6)=1.2$ ;  $V_{\text{микро}}=1$  км/с;  $V_{\text{макро}}=2.5$  км/с

Рис. 6. Профиль линии  $\lambda$  769.9 нм в центре диска  $\mu=1.0$  для моделей атмосферы Солнца HSRA — 1 и [11] — 2;  $\lg A(K)=5.08$ . Для сравнения приведен профиль, рассчитанный со значением содержания  $\lg A(K)=4.70$  (сплошная линия, модель HSRA).  $E(\gamma_6)=1.2$ ;  $V_{\text{макро}}=2$  км/с

хромосфере (аппроксимация 4) также искажает физическую картину, определяя неверно значения  $J(\nu, t)$  и область, начиная с которой  $T_r$  становится постоянной. Однако благодаря близости значений  $b_1, b_2$  в области образования линии  $\lambda$  769.9 нм для аппроксимации 4 к значениям  $b_1, b_2$  для аппроксимаций 1, 2, профиль аппроксимации 4 не сильно отличается от профиля аппроксимаций 1, 2 для всех положений на диске. При этом наилучшее согласие с наблюдениями дают профили аппроксимаций 1, 2. Отличия между профилями этих аппроксимаций вызваны различием в используемых  $\sigma_{17}$  и не превышают 1%.

Профиль аппроксимации 3 близок к рассчитанному для ЛТР-случая, и с наблюдениями согласуется плохо. Причина — слишком низкие по сравнению с другими аппроксимациями значения  $b_1$  (рис. 5).

Таким образом, при не-ЛТР синтезе солнечного линейчатого спектра нейтрального калия следует избегать аппроксимации поля излучения в связанно-свободном континууме функцией Планка. Оптимальным является метод, в котором средняя интенсивность  $J$  для каждого континуума находится из решения уравнений переноса в двухуровневом приближении.

Погрешности в сечениях фотоионизации  $\sigma_{17}$  ( $l \geq 2$ ) оказывают слабое влияние на  $b_1$  и профиль линии  $\lambda$  769.9 нм.

**Влияние температуры.** Для выяснения вопроса о чувствительности линии  $\lambda$  769.9 нм к распределению температуры мы провели не-ЛТР синтез спектра К I для двух случаев: в первом — использована модель атмосферы HSRA; во втором — распределение температуры в этой модели модифицировалось. В области атмосферы  $\lg \tau_5$  от  $-5$  до  $-0.8$  мы задали температурное распределение, соответствующее модели [11]. Последняя в области температурного минимума горячее HSRA примерно на 300 К. Вне этой области распределение  $T$  совпадает с распределением из модели HSRA.

Результаты наших расчетов показывают, что резонансную линию  $\lambda$  769.9 нм К I можно использовать для уточнения температуры в

области температурного минимума и верхней фотосферы. Изменение температуры в указанной области ведет к изменению ее профиля  $\tau_\lambda$  и особенно  $\tau_0$  (рис. 6). Увеличение  $T$  на величину  $\Delta T$  (приблизительно 300 К) увеличивает  $\tau_0$  примерно на 12%. Чувствительность крыльев ниже.

*Уточнение содержания.* В рамках модели HSRA не-ЛТР профиль  $\lambda$  769.9 нм согласуется с наблюдениями (с погрешностью около 1%) как со значением содержания  $\lg A(K) = 5.08$ , так и с  $\lg A(K) = 5.14$ . Уменьшение содержания калия на Солнце приблизительно в 2.5 раза ( $\lg A(K) = 4.70$ ) увеличивает центральную остаточную интенсивность этой линии примерно на 10% (рис. 6). Воспроизвести наблюдаемые (центр — край) профили этой линии с минимальным значением содержания калия, полученным Голдбергом и др. [16] ( $\lg A(K) = 4.70$ ), с помощью не-ЛТР расчетов не удастся. Наш диапазон  $\lg A(K) = 5.08 - 5.14$  хорошо согласуется со значением содержания калия из [21].

**Выводы.** В заключение кратко сформулируем основные результаты нашей работы. 1. Расчеты профиля резонансной линии  $\lambda$  769.9 нм с учетом отклонения от ЛТР позволяют воспроизвести наблюдения «центр — край» с погрешностью примерно 1%. Объяснить с помощью ЛТР-теории поведение (от центра к краю) профиля этой линии невозможно. 2. Проникающее из более горячих фотосферных слоев связано-свободное излучение К I ведет к недонаселенности его уровней в нижней хромосфере, области температурного минимума и в верхней фотосфере. 3. При не-ЛТР синтезе линии  $\lambda$  769.9 нм К I модель атмосферы Солнца с низким значением температурного минимума ( $T_{\min} = 4170$  К) является предпочтительнее.

1. Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами.— М.: Наука, 1973.— 144 с.
2. Гасанализаде А. Г. Исследование асимметрии и красного смещения линии 7699 Å калия в спектре Солнца // Солнеч. данные.— 1979.— № 7.— С. 85—91.
3. Гуртовенко Э. А. Солнечный горизонтальный телескоп АЦУ-5 с монохроматором двойной дифракции // Астрометрия и астрофизика.— 1969.— Вып. 8.— С. 77—85.
4. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., Орлова Т. В. и др. Профили избранных фраунгоферовых линий для различных положений центр — край на диске Солнца.— Киев: Наук. думка, 1975.— 221 с.
5. Щукина Н. Г. Анализ солнечного спектра калия с учетом отклонения от ЛТР. I. Начальные оценки населенностей энергетических уровней // Астрометрия и астрофизика.— 1981.— Вып. 45.— С. 13—20.
6. Щукина Н. Г. О роли некоторых параметров синтеза солнечного спектра нейтрального калия при условиях отклонения от ЛТР. II. Фотоионизация // Солнеч. данные.— 1983.— № 1.— С. 71—77.
7. Щукина Н. Г. Неравновесное образование линий нейтрального кислорода в солнечной атмосфере.— Киев, 1984.— 31 с.— (Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-84-75Р).
8. Auer L. H. Application of the complete linearization method to the problem of the non-LTE line formation // Astrophys. J.— 1973.— 180, N 2.— P. 469—472.
9. Auer L. H., Mihalas D. Non-LTE model atmospheres. III. A complete linearization method // Ibid.— 1969.— 158, N 3.— P. 641—655.
10. Auman J. R., Woodrow J. E. J. Ionization equilibrium in the atmospheres of late-type giants // Ibid.— 1975.— 197, N 1.— P. 163—173.
11. Ayres T. R., Linsky J. L. The Mg II h and k lines. II. Comparison with synthesized profiles and Ca II K // Ibid.— 1976.— 205, N 3.— P. 874—894.
12. Brookes J. R., Isaak G. R., McLeod C. P. et al. The search for solar oscillations, 1974 to 1976 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.— 1978.— 184, N 3.— P. 759—767.
13. Burgess A., Seaton M. J. A general formula for the calculation of atomic photoionization cross-sections // Ibid.— 1960.— 120, N 2.— P. 121—151.
14. Feautrier M. P. Sur la resolution numerique de l'equation de transfert // C. r. Acad. sci.— 1964.— 258, N 12.— P. 3189—3191.
15. Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny J. The Harvard-Smithsonian reference atmosphere // Solar Phys.— 1971.— 18, N 3.— P. 347—365.
16. Goldberg L., Müller E. A., Aller L. H. The abundances of the elements in the solar atmosphere // Astrophys. J. Suppl. Ser.— 1960.— 5, N 45.— P. 1—138.
17. Goldberg L., Ramsey L., Testermann L., Carbon D. High-resolution profiles of sodium and potassium lines in  $\alpha$  Ori // Astrophys. J.— 1975.— 199, N 2.— P. 427—431.
18. Jager C. de, Neven L. Damping constants for infrared Fraunhofer lines // Solar Phys.— 1970.— 11, N 1.— P. 3—10.



19. *Marr G. V.* Photoionization processes in gases.—New York, London: Acad. press, 1967.—282 p.
20. *Peach G.* A revised general formula for the calculation of atomic photoionization cross-sections // *Mem. Roy. Astron. Soc.*—1967.—71, part I.—P. 13—27.
21. *Reza de la R., Müller E. A.* The potassium abundance in the solar photosphere // *Solar Phys.*—1975.—43, N 1.—P. 15—31.
22. *Roca-Cortés T., Vazquez M., Wohl H.* Space and time variations of K I 7699 solar line profile // *Ibid.*—1983.—88, N 1/2.—P. 1—8.
23. *Seaton M. J.* Recent work on problems of electron collisions with atoms and ions // *Proc. Nat. Acad. Sci. India.*—1963.—A33.—P. 543—552.
24. *Snider J. L.* New measurement of the solar gravitational red shift // *Phys. Rev. Letters.*—1972.—28.—P. 853—856.
25. *Unsöld A.* Physik der Sternatmosphäre. Vol. 2.—Berlin: Springer, 1955.—866 p.
26. *Wiese W. L., Smith M. W., Miles B. M.* Atomic transition probabilities // *Nat. Bur. Stand.* 22, Washington D. C., 1969.—2.—268 p.

Глав. астрон. обсерватория АН УССР,  
Киев

Поступила в редакцию 15.05.86,  
после доработки 07.08.86

## Научные конференции

---

### СИМПОЗИУМ МАС № 134 «АКТИВНЫЕ ЯДРА ГАЛАКТИК»

Симпозиум состоится 15—19 августа 1988 г. в Санта-Круз (Калифорния, США). Научная программа: новые данные наблюдений (спектроскопия в оптическом, ИК-, УФ-, рентгеновском и радиодиапазонах; фотометрия; распределение), новые теоретические исследования (структура; поле скоростей; источники и механизмы энергии; происхождение и эволюция).

### СИМПОЗИУМ МАС № 135 «МЕЖЗВЕЗДНАЯ ПЫЛЬ»

Симпозиум состоится 26—30 июля 1988 г. в Маунтин-Вью (Калифорния, США). Научная программа: наблюдения и свойства межзвездных частиц; образование частиц в звездных выбросах; пылевые частицы в межзвездной среде; модели межзвездных частиц и лабораторные исследования; связь между межзвездной пылью, межпланетными пылевыми частицами, кометами и метеоритами.