

УДК 524.3-355

40 ЛЕТ КАЗАНСКОЙ ШКОЛЕ НЕ-ЛТР-ИССЛЕДОВАНИЙ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ

*Л.И. Машонкина***Аннотация**

В статье дается обзор работ по изучению формирования спектральных линий в неравновесных условиях звездных атмосфер, выполненных основателем этого астрофизического направления в нашей стране Н.А. Сахибуллиным и его учениками.

Ключевые слова: звездные атмосферы, перенос излучения, статистическое равновесие атомов, звездные спектры.

Введение. Что такое не-ЛТР-подход?

В 1972 г., почти 40 лет тому назад, в *Астрономическом Циркуляре* была опубликована заметка «Центральные глубины резонансных линий Mg II около 2800 Å, полученные без предположения о ЛТР». Это была первая работа в нашей стране, посвященная моделированию формирования спектральных линий в звездных атмосферах в неравновесных условиях. Она была сделана Н.А. Сахибуллиным и положила начало новому для нашей страны астрофизическому направлению. Чем новый подход отличался от классического, общепринятого в начале 1970-х и, пожалуй, остающегося общепринятым до настоящего времени?

Излучение, выходящее из звезды, находится путем решения уравнения переноса излучения:

$$\mu \frac{dI_\nu(z, \mu)}{dz} = -\chi_\nu(z)I_\nu(z, \mu) + \eta_\nu(z). \quad (1)$$

Но сначала на каждой глубине нужно рассчитать коэффициенты поглощения $\chi_\nu(z)$ и излучения $\eta_\nu(z)$, которые зависят от концентрации поглощающих и излучающих атомов n_i . При предположении о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР) для вычисления n_i используют формулы Больцмана и Саха. Вычисления простые, и атомные данные нужны только для избранных исследуемых линий. Условие применимости ЛТР является очень жестким: для каждого перехода в атоме должен существовать детальный баланс. В поверхностных слоях звезды, где длина свободного пробега фотонов становится большой и поле излучения далеко от равновесного, детальный баланс в переходах нарушается.

При отказе от ЛТР (*не-ЛТР-подход*) населенность каждого уровня находится из уравнения баланса всех радиативных и столкновительных процессов, заселяющих и опустошающих уровень, то есть из уравнения статистического равновесия (СР):

$$n_i \sum_{j \neq i} (R_{ij} + C_{ij}) = \sum_{j \neq i} n_j (R_{ji} + C_{ji}), \quad i = 1, \dots, NL. \quad (2)$$

Здесь C_{ij} – скорость столкновительных процессов, она зависит от локальных температуры T и давления P и вычисляется в предположении о максвелловском распределении частиц по скоростям. Столкновения способствуют установлению термодинамического равновесия (ТР). Радиативная скорость R_{ij} зависит от средней

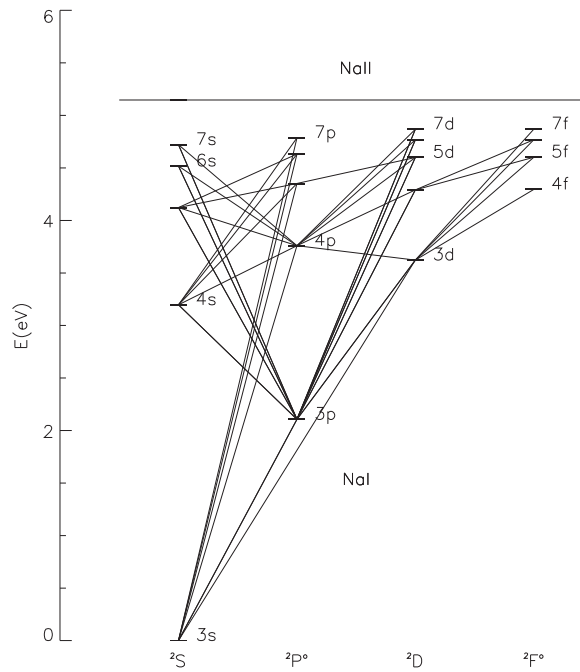


Рис. 1. Диаграмма энергетических состояний Na I

интенсивности излучения в переходе $i-j$. Поле излучения нелокально по своей природе, и радиативные процессы стремятся вывести систему из ТР. Следовательно, система уравнений СР (2) для всех уровней в атоме должна решаться совместно с уравнениями переноса излучения (1) на частотах всех радиативных переходов. Таким образом, населенность уровня на данной глубине зависит от физических условий повсюду в атмосфере. Вычисления громоздки, требуется большое количество самых разных атомных данных: сечений фотоионизации, вероятностей переходов, сечений неупругих столкновений для всей системы уровней и переходов в атоме.

В природе каждый атом и ион имеет очень большое количество связанных состояний, приближающееся к бесконечности. На практике мы используем *модель атома* с конечным числом уровней. Точность вычисления СР зависит от полноты модели атома, от точности используемых атомных параметров. Структура энергетических состояний существенно различается у разных атомов. Например, у Na I она простая (рис. 1). Модель атома Na I может быть ограничена уровнями до $n = 7$, и эта система уровней дает всего 80 радиативных переходов. Совсем другое дело – Fe I (рис. 2). Только уровней, измеренных в лаборатории, больше 900, и они связаны более чем 80000 радиативными переходами.

Необходимость отказа от ЛТР при рассмотрении формирования спектральных линий была осознана еще в 30-е годы XX в. Например, не-ЛТР-подход успешно применяется для расчета спектральных линий планетарных туманностей и зон H II. Но это оптически тонкие среды, где не нужно решать уравнение переноса, и задача сильно упрощается. Для звездных атмосфер не-ЛТР-подход начал применяться только с появлением мощных компьютеров в середине 60-х годов. Первые исследования были связаны с горячими звездами, так как именно в атмосферах горячих звезд радиативные процессы доминируют над столкновительными и препятствуют установлению ТР, и следовательно, нужно ожидать наибольших отклонений от ЛТР.

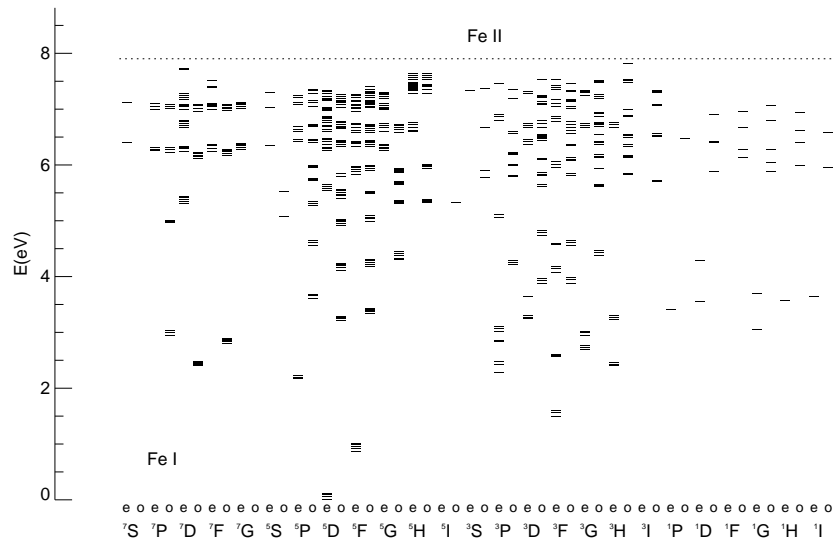


Рис. 2. Диаграмма энергетических состояний Fe I

1. Не-ЛТР-исследования в Казани. Горячие звезды

Вот и первая казанская работа была посвящена моделированию формирования линий в атмосферах звезд с эффективными температурами $T_{\text{eff}} = 12000\text{--}20000$ К. Используя модель атома, включающую 6 нижних уровней Mg II, Сахибуллин [1] показал, что в неравновесных условиях линии Mg II усиливаются на 20–40% по сравнению со случаем ЛТР. Это обусловлено падением функции источников в поверхностных слоях относительно функции Планка ($S_\nu < B_\nu$), вследствие опустошения верхнего уровня при спонтанных переходах на нижний уровень: $b_j < b_i$. Здесь $b_i = n_{i,NLTE}/n_{i,LTE}$ – это так называемый b -фактор уровня. Выяснение в каждом случае механизма отклонений от ЛТР, а не просто фиксация результатов вычислений – это отличительная особенность всех работ Н.А. Сахибуллина и его группы и одна из составляющих его успеха.

Глубокое понимание физических процессов, происходящих в атоме, помогло Н.А. Сахибуллину [2, 3] разгадать загадку эмиссионного триплета C III 9710 Å в наблюдаемых спектрах O-звезд. Если звезда одиночная или двойная, но в широкой паре, то эмиссионная линия в ее спектре – это аномалия. Температура в атмосфере звезды падает наружу, и в рамках ЛТР спектральные линии являются абсорбционными. И действительно, в подавляющем большинстве случаев наблюдаемые спектры звезд – чисто абсорбционные. Исключение составляют очень сильные резонансные линии у холодных звезд с хромосферой и горячих звезд со звездным ветром. В первом случае эмиссия в ядре связана с инверсией температуры, а во втором – с излучением протяженной оптически тонкой оболочки (звездного ветра). Но триплет C III 9710 Å, связанный с переходом между высоковозбужденными уровнями ($3p\text{--}3d$), образуется глубоко в атмосфере. Так почему же появляется эмиссия в C III 9710 Å при том, что другой триплет C III 4650 Å ($3s\text{--}3p$) наблюдается в абсорбции у этих же самых звезд?

Расчеты выполнялись с моделью атома, включающей 16 уровней C III, 2 уровня C IV и основное состояние C V. При $T_{\text{eff}} < 35000$ К ионы C III составляют большую часть углерода. Линии C III – сильные, и происходит радиативная накачка верхних уровней, так что $b(3s, 3p, 3d) > 1$, и триплет 9710 Å получается в расчетах абсорбционным в согласии с наблюдениями звезд спектрального класса В.

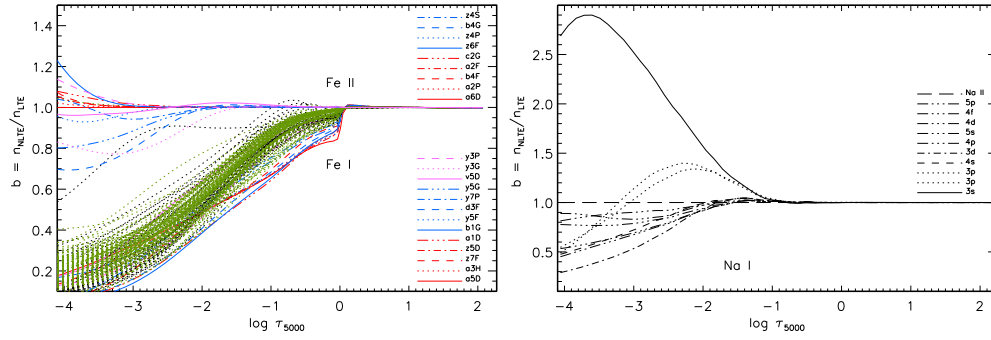


Рис. 3. b -факторы уровней Fe I–Fe II (левая панель) и Na I (правая панель) в модели атмосферы с $T_{\text{eff}} = 7500$ К и $\log g = 2$. Расчеты выполнены автором с моделями атома из [5] для Fe и [6] для Na

А при $T_{\text{eff}} > 35000$ К эффективно идет процесс ионизации С III, и углерод становится преимущественно 3-кратно ионизованным. Скорость фотоионизации на данной глубине определяется средней интенсивностью излучения за порогом ионизации J_ν , которая слабо зависит от локальных условий, а скорость обратного процесса – локальным значением функции Планка. У основного и низковозбужденных уровней С III пороги ионизации находятся в далеком ультрафиолете (УФ), где $J_\nu > B_\nu(T)$, что ведет к опустошению уровней С III по сравнению с равновесными населенностями, и для всех уровней С III $b_i < 1$. В работах [2, 3] еще не появился термин *сверхионизация*, он появится позже, но само явление было уже описано. Для высоковозбужденных уровней с порогами ионизации в инфракрасном (ИК) диапазоне, наоборот, $J_\nu < B_\nu(T)$, и обратные процессы превалируют над фотоионизацией. В результате верхние уровни оказываются ближе к ТР, чем нижние ($b_i < b_j$), что ведет к ослаблению поглощения в линиях вследствие не только уменьшения коэффициента поглощения в линии, но и увеличения функции источников относительно функции Планка. Для ИК-линий увеличение потока в линии на фоне низкого потока в континууме создает предпосылки для появления эмиссии, что и случилось с триплетом 9710 \AA у звезд с $T_{\text{eff}} > 35000$ К. Расчеты показали, что в видимом диапазоне триплет С III 4650 \AA остается абсорбционным вплоть до повышения T_{eff} до 45000 К.

2. Не-ЛТР-исследования в Казани. F–G–K звезды

2.1. Формирование линий Fe I и Fe II в атмосферах звезд. Не-ЛТР-исследования требуют больших усилий и времени на подготовительную работу по сбору атомных данных, на проведение расчетов, поэтому каждая новая работа начиналась только после тщательного изучения астрофизической проблемы. В начале 80-х годов XX в. Боярчук и Любимков обнаружили при ЛТР-анализе F-сверхгигантов, что использование линий Fe I ведет к меньшим значениям микротурбулентной скорости ξ_t , чем те, что получаются по линиям Fe II (см. ссылки в [4]). Они предположили, что из-за низкой плотности вещества в атмосферах сверхгигантов столкновительные процессы могут быть неэффективными в поддержании ТР, и отклонения от ЛТР влияют, в первую очередь, на населенности уровней Fe I, так как лишь малая доля всех атомов Fe находится в нейтральном состоянии и даже небольшое изменение баланса скоростей ионизации и рекомбинации приведет к существенному изменению концентрации Fe I.

В совместной работе Боярчука, Любимкова и Сахибуллина [4] была построена модель атома, включающая 12 уровней Fe I и основное состояние Fe II.

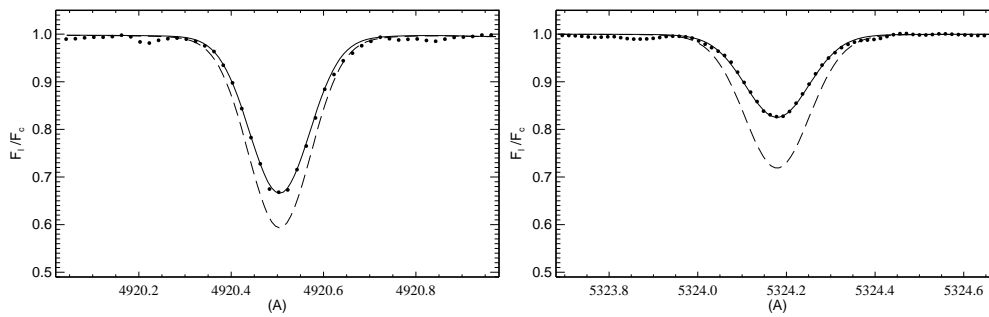


Рис. 4. Наблюдаемые (точки) профили линий Fe I 4920 Å (левая панель) и 5324 Å (правая панель) у звезды HD 84937 в сравнении с теоретическими не-ЛТР- (сплошная кривая) и ЛТР- (штриховая кривая) профилями, рассчитанными при одном содержании железа. Наблюдения получены Клаусом Фурманом с разрешением $R = 60000$ на телескопе 2.2-м в обсерватории Калар-Альто (Испания). Расчеты выполнены автором с моделью атома из [5] и моделью атмосферы 6350/4.09/-2.08. Разница содержаний железа, полученных в рамках не-ЛТР-подхода и ЛТР-предположения, составляет +0.29 dex для линии Fe I 4920 Å и +0.40 dex для линии Fe I 5324 Å

Расчеты показали повышение ионизации Fe I по сравнению с ЛТР в атмосферах F-сверхгигантов. И здесь этот эффект получил уже название сверхионизации. На рис. 3 показано поведение b -факторов в модели типичного F-сверхгиганта с $T_{\text{eff}} = 7500$ К. Для всех уровней Fe I $b_i < 1$. Сверхионизация обусловлена избыточной (по сравнению со случаем ЛТР) фотоионизацией уровней с порогами ионизации в диапазоне (1550–3000) Å, где $J_\nu > B_\nu(T)$. Сверхионизация практически не изменяет концентрацию Fe II. Уменьшение населенности уровней Fe I ведет к ослаблению линий Fe I. Если сравнивать не-ЛТР- и ЛТР-расчеты с наблюдениями, то получается разное содержание или разные ξ_t . Разность между не-ЛТР- и ЛТР-содержанием положительна для линий Fe I и у F-сверхгигантов может достигать до $\Delta_{\text{NLTE}} = +1$ dex согласно [4]. Становится понятным, почему при анализе линий Fe I в рамках ЛТР приходится уменьшать ξ_t , если содержание железа зафиксировано по линиям Fe II.

Сильной сверхионизации Fe I можно ожидать и у звезд с дефицитом металлов. У F–K звезд основным источником непрозрачности в УФ является связанно-свободное ($b-f$) поглощение металлов. С уменьшением содержания металлов ослабевает непрозрачность и растет поток в УФ. Определение содержания по линиям Fe I и Fe II в рамках ЛТР у звезд с дефицитом металлов показало, что линии Fe I дают систематически более низкое содержание, чем линии Fe II. Эта проблема была рассмотрена Бикмаевым, Бобрицким и Сахибуллиным [7]. Модель атома железа была расширена до 19 уровней Fe I и было показано, что не-ЛТР-поправка для линий Fe I может достигать +0.6 dex у звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] = -2$. Из-за громоздкости расчетов они были проведены лишь для отдельных звезд, и авторам удалось добиться согласия содержания, полученного по линиям двух стадий ионизации. Рис. 4 иллюстрирует отклонения от ЛТР для линий Fe I 4920 и 5324 Å у звезды HD 84937 с $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.08$. В работе [7] была дана важная методическая рекомендация: если нет возможности проводить не-ЛТР-расчеты для Fe I, то при определении содержания железа у звезд нужно использовать линии Fe II, для которых отклонения от ЛТР невелики, что подтвердили более поздние расчеты.

Конечно, это выход из положения, если нужно определить только содержание железа, и именно так до сих пор поступает большинство исследователей. Но линии Fe I и Fe II используются также при определении силы тяжести $\log g$,

особенно у звезд с дефицитом металлов, которые, как правило, расположены далеко от Солнца и их тригонометрические параллаксы пока не могут быть измерены, а также при определении ξ_t и T_{eff} . Поэтому не-ЛТР-проблема Fe I рассматривалась в литературе вновь и вновь по мере появления новых атомных данных для энергий уровней и сечений фотоионизации. В нашей недавней работе [5] была построена наиболее полная модель атома Fe I из всех, имеющихся в литературе. Для правильного расчета статистического равновесия Fe I нужно обеспечить не только каналы стока в континуум, их роль играет фотоионизация низковозбужденных уровней, но и источники притока из континуума. А эту роль выполняют высоковозбужденные уровни с энергией ионизации порядка средней кинетической энергии электронов kT , которая у звезд солнечного типа составляет ~ 0.5 эв. На рис. 2 показаны уровни Fe I, известные из лабораторных измерений [8]. Но еще более 2000 уровней ниже порога ионизации были предсказаны в расчетах атомной структуры [9]. Наша модель атома построена с учетом всех лабораторных и предсказанных уровней Fe I. Мы пренебрегли тонким расщеплением уровней и из предсказанных высоковозбужденных уровней Fe I сформировали 6 суперуровней, так что модель атома железа включает 239 уровней Fe I, 89 уровней Fe II и основное состояние Fe III. Усовершенствование модели атома и использование точных сечений фотоионизации для Fe I не изменили выводы более ранних исследований в качественном отношении: нейтральное железо сверхионизовано в атмосферах звезд с $T_{\text{eff}} > 4500$ К. Но отклонения от ЛТР стали меньше. У звезд солнечного типа с умеренным дефицитом металлов ($[\text{Fe}/\text{H}] \geq -1$) не-ЛТР-поправки к содержанию малы и не превышают 0.1 dex. Однако для звезд с большим дефицитом железа и особенно гигантов учет отклонений от ЛТР обязателен.

С новой моделью атома было проверено ионизационное равновесие Fe I/Fe II у избранных звезд с надежными параметрами и показано, что не-ЛТР-подход работает. Но проблему нельзя считать закрытой, так как в своих расчетах мы вынуждены вводить неупругие столкновения с атомами водорода и описывать их сечения параметрически из-за отсутствия точных данных. Ждем помощи от физиков-теоретиков, чтобы устранить эту, надеемся, последнюю неопределенность не-ЛТР-проблемы для Fe I.

2.2. Формирование линий Na I в атмосферах звезд. Боярчук и Любимков предложили еще одну интересную проблему, связанную с F-сверхгигантами. Если линии Fe I в спектрах этих звезд слишком слабы для известных звездных параметров и содержания, полученного по линиям Fe II, то линии Na I, наоборот, слишком сильны. Содержание натрия у F-сверхгигантов получается больше солнечного с $[\text{Na}/\text{Fe}] = 0.3\text{--}0.7$ dex, и избыток растет с ростом светимости (см. ссылки в [10]).

Не-ЛТР-расчеты были проведены с моделью атома натрия, включающей 19 уровней Na I и основное состояние Na II (рис. 1), построенной Сахибуллиным [11]. На рис. 3 представлены b -факторы уровней Na I в модели атмосферы типичного F-сверхгиганта с $T_{\text{eff}} = 7500$ К. Основное состояние ($3s$) и первый возбужденный дублет ($3p$) перезаселены относительно равновесных населенностей в области формирования линий. Значит, полная концентрация Na I больше равновесной, и можно говорить о *сверхрекомбинации* Na I [10]. Почему в одних и тех же физических условиях отклонения от ЛТР прямо противоположны у атомов с почти одинаковой степенью ионизации? И Fe I, и Na I – это недоминирующие стадии ионизации в атмосферах с $T_{\text{eff}} > 4500$ К. И в том, и в другом атоме идут конкурирующие процессы: избыточная фотоионизация низковозбужденных уровней вследствие $J_\nu(\text{УФ}) > B_\nu(T)$ и избыточная фоторекомбинация на верхние уровни

вследствие $J_\nu(\text{ИК}) < B_\nu(T)$. Вслед за фоторекомбинацией следует каскад спонтанных переходов, которые стремятся увеличить населенность нижних уровней. У Fe I много низковозбужденных уровней, и их сечения фотоионизации высокие. Фотоионизация быстро «выбрасывает» назад в континуум то, что приходит сверху. Натрий – щелочной металл, и сечение фотоионизации основного состояния низкое. Фотоионизация не может конкурировать с пополнением основного состояния при спонтанных переходах из возбужденных уровней, которые, в свою очередь, пополняются из континуума. Линии Na I усиливаются по сравнению с ЛТР, Δ_{NLTE} отрицательна и может достигать до -0.7 dex в зависимости от звездных параметров. Учет отклонений от ЛТР частично снимает проблему избытков натрия у F-сверхгигантов, но не решает ее полностью. Как обсуждается в [10] и более поздних работах, этот избыток обусловлен эволюционным изменением содержания натрия у звезд на продвинутой стадии эволюции, к которым относятся F-сверхгиганты.

2.3. Формирование линий K I в атмосферах звезд. Понимание механизма отклонений от ЛТР для Na I позволило спланировать исследование спектра K I у звезд солнечного типа. Калий – это тоже щелочной металл, и следует ожидать сверхрекомбинации K I в атмосферах звезд и усиления его линий по сравнению с ЛТР. Была построена модель атома калия, которая включает 35 уровней K I и основное состояние K II [12]. Ожидания полностью оправдались, и оказалось, что не-ЛТР-эффекты для линий K I даже больше, чем для Na I: Δ_{NLTE} варьируется от -0.2 до -0.6 dex в зависимости от звездных параметров.

Разработанная методика была успешно применена при анализе содержания калия у выборки карликов и субкарликов поздних спектральных типов [13]. Среди таких объектов в современную эпоху можно наблюдать как очень старые звезды с возрастом, сравнимым с возрастом Галактики, так и совсем молодые звезды. Индикатором возраста служит содержание железа $[\text{Fe}/\text{H}]$. Как правило, чем меньше $[\text{Fe}/\text{H}]$, тем больше возраст объекта. Непроэволюционировавшие звезды сохраняют на своей поверхности начальный химический состав, поэтому, выбирая звезды с различным $[\text{Fe}/\text{H}]$, можно изучать химическую эволюцию Галактики. Относительное содержание $[\text{K}/\text{Fe}]$, полученное в рамках ЛТР для выборки из 33 звезд с $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -1 до 0 , демонстрирует большой разброс данных (см. рис. 5 из [13]). А при не-ЛТР звезды выстраиваются строго в соответствии со своей металличностью: отношение $[\text{K}/\text{Fe}]$ растет с уменьшением $[\text{Fe}/\text{H}]$. И это дает надежное наблюдательное ограничение на модели эволюции содержания калия в Галактике. Наблюдения свидетельствуют в пользу синтеза калия при взрывном горении кислорода в SNe II и определенно не подтверждают сценарий гидростатического горения кислорода.

2.4. Ионизационное равновесие Ca I/Ca II у HE 1327–2326. Свою логическую цепочку можно выстроить и для атомов, которые, как и Fe I, должны быть подвержены сверхионизации в атмосферах звезд солнечного типа. Это Mg I, Si I, Ca I, которые содержат лишь незначительную долю своего элемента и имеют большие сечения фотоионизации. Наши исследования [14–16] полностью подтвердили эти ожидания. Остановимся здесь на Ca I в связи с проблемой определения ускорения силы тяжести у HE 1327–2326 – звезды с рекордно низким в настоящее время содержанием железа $[\text{Fe}/\text{H}] = -5.6$ [17]. Изучение подобных объектов важно для понимания начала звездообразования в нашей Галактике. HE 1327–2326 – это далекая звезда, и единственный способ определения ее ускорения силы тяжести – спектроскопический, или метод ионизационного равновесия. Наблюдаемый спектр звезды чрезвычайно беден линиями. Кальций – единственный элемент, наблюдаемый в двух стадиях ионизации. При известной $T_{\text{eff}} = 6180$ K и грубых оценках

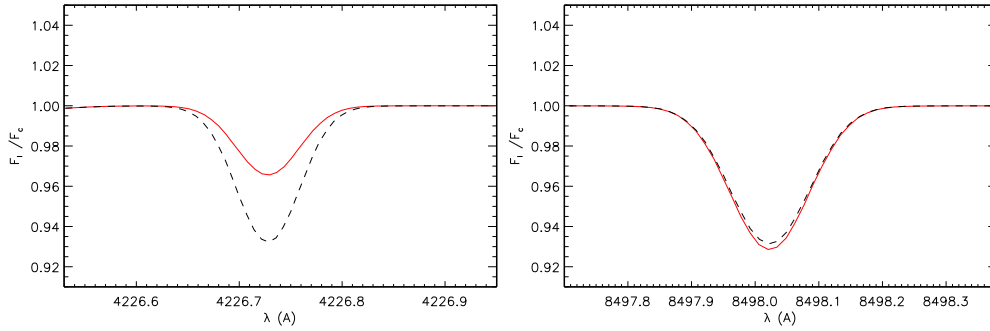


Рис. 5. Иллюстрация отклонений от ЛТР для резонансной линии Ca I 4226 Å (левая панель) и линии Ca II 8498 Å (правая панель) у звезды HE 1327–2326. Теоретические не-ЛТР- (сплошная кривая) и ЛТР- (штриховая кривая) профили рассчитаны при одном содержании кальция $[Ca/H] = -5$ с моделью атмосферы 6180/3.70/-5

$\log g > 3.5$ разность содержаний (Ca II–Ca I) составляет $\sim +0.5$ dex, если анализ проводится в рамках ЛТР. Более низкое содержание, полученное при ЛТР по линии Ca I, неудивительно, так как Ca I должен быть сверхионизован в атмосферах звезд с дефицитом металлов.

Не-ЛТР-расчеты с моделью атома, включающей 63 уровня Ca I, 37 уровней Ca II и основное состояние Ca III, показали, что сверхионизация Ca I действительно существует и отклонения от ЛТР для Ca I велики при низком $[Fe/H]$ [15]. На рис. 5 представлены теоретические не-ЛТР- и ЛТР-профили резонансной линии Ca I 4226 Å и линии Ca II 8498 Å, рассчитанные для модели атмосферы 6180/3.70/-5 при одном содержании кальция $[Ca/H] = -5$. Отклонения от ЛТР велики для Ca I 4226 Å, так что разность не-ЛТР- и ЛТР-содержаний у HE 1327–2326 составляет +0.31 dex. Для линии Ca II 8498 Å не-ЛТР-эффекты малы, но зато она чувствительна к варьированию $\log g$. Содержание кальция по двум стадиям ионизации удалось согласовать в не-ЛТР-расчетах при $\log g = 3.7$ [18]. Таким образом, HE 1327–2326 – это звезда-субгигант. Среди обнаруженных к настоящему времени объектов со сверхдефицитом металлов ($[Fe/H] < -4$) доминируют холодные гиганты, поэтому обнаружение непроэволюционировавшей звезды очень важно для уточнения наших представлений о формировании и эволюции звезд в молодой Галактике.

3. Распространение исследований на неклассические атмосферы

Было естественно распространить исследования формирования спектральных линий в неравновесных условиях на объекты, где условия, очевидно, неравновесные. Приведем два примера.

Первый пример – это тесные двойные системы, в которых более массивная компонента уже завершила свою ядерную эволюцию и стала белым карликом или нейтронной звездой, а вторичная компонента – холодная звезда. Такие системы наблюдаются как рентгеновские двойные, катаклизмические и предкатаклизмические переменные. Холодная звезда облучается со стороны более горячей звезды, и в ее атмосфере образуется область с температурой, более высокой, чем в области формирования континуума. Условия формирования спектральных линий в таких областях сильно отличаются от равновесных. Сахибуллин и Шиманский [19] впервые поставили и решили не-ЛТР-проблему в облучаемых атмосферах для Na I. Но здесь мы обсудим результаты, полученные в [20] для Ca II в атмосферах звезд, облучаемых рентгеновским излучением. Рассмотрим случай вторичной

звезды с $T_{\text{eff}} = 10000$ К. В классической необлучаемой атмосфере с такой температурой кальций находится преимущественно в двукратно ионизованном состоянии, и избыточная по сравнению с ЛТР фотоионизация низковозбужденных уровней Ca II приводит к его сверхионизации (см. рис. 1b из [20]). Отклонения от ЛТР качественным образом отличаются в облучаемой атмосфере. Пусть поток рентгеновского излучения равен интегральному потоку необлученной атмосферы. В той области, где произошло повышение температуры вследствие облучения, температура ионизирующего излучения оказывается меньше локальной кинетической температуры $T_{\text{rad}}(\text{УФ}) < T$, и фоторекомбинация доминирует над прямыми процессами для низковозбужденных уровней, приводя к их перезаселенности (см. рис. 1d из [20]). Резонансная линия Ca II 3933 Å усиливается по сравнению со случаем ЛТР вследствие увеличения коэффициента поглощения в линии и падения функции источников относительно функции Планка. Как показано в [20] (рис. 3c), эффект усиливается с ростом падающего рентгеновского потока.

Второй пример связан с пульсирующими, химически пекулярными (гоAr) звездами. В их спектрах редкоземельные элементы (РЗЭ) – неодим, празеодим и др. – наблюдаются в двух стадиях ионизации как однократно и двукратно ионизованные атомы. При классическом ЛТР-анализе разные ионы дают различное содержание, и разница составляет 1.5–2 dex, что невозможно объяснить ошибками определения атомных параметров и параметров звезд. Для того чтобы согласовать содержание по разным стадиям ионизации, Рябчикова и др. [21] выдвинули гипотезу о том, что РЗЭ распределены неравномерно в атмосферах гоAr-звезд, а именно они концентрируются в самых поверхностных слоях. Основания для таких предположений существуют. Наблюдения свидетельствуют о том, что в атмосферах гоAr-звезд нет конвективных и турбулентных движений. Стабильные условия благоприятствуют разделению химических элементов вследствие гравитационного осаждения и лучистого давления. Их совместное действие называется атомной диффузией. Диффузионные расчеты для элементов группы железа и более легких элементов (см. ссылки в [22]) подтвердили, что диффузия способна производить стратификацию химических элементов в атмосферах гоAr-звезд. Для редкоземельных элементов диффузионные расчеты еще не проводились из-за их чрезвычайной громоздкости и отсутствия необходимых атомных данных. Поэтому приходится определять вертикальное распределение РЗЭ в атмосферах гоAr-звезд эмпирическим путем. Знание распределения химических элементов в атмосферах гоAr-звезд важно для понимания не только механизмов химической пекулярности, но и природы пульсаций этих звезд. Анализ в рамках ЛТР для звезды HD 24712 (7250/4.3/0) показал, что для того чтобы согласовать получаемое содержание по линиям Nd III и Nd II, нужно разместить слой неодима выше $\log \tau_{5000} = -8$ [21]. Но в столь высоких слоях ЛТР не работает из-за чрезвычайно низкой плотности вещества и малых скоростей столкновительных процессов! Следовательно, проблема редкоземельных элементов у гоAr-звезд должна решаться с учетом отклонений от ЛТР.

Были впервые построены модели атома неодима [23] и празеодима [22]. После объединения состояний с близкими энергиями получилось 247 уровней Nd II и 68 уровней Nd III для неодима и 294 уровня Pr II и 54 уровня Pr III для празеодима. Не-ЛТР-расчеты проведены для HD 24712 и еще трех гоAr-звезд с разным распределением неодима и празеодима в атмосфере. Оказалось, что без стратификации этих элементов нельзя решить проблему разного содержания по разным ионам. Но слой, обогащенный неодимом и празеодимом, располагается глубже, чем это получалось при ЛТР. Например, у HD 24712 нижняя граница слоя празеодима располагается на $\log \tau_{5000} = -4.5$ и содержание $[\text{Pr}/\text{H}] = 4.5$ [22]. Анализ механизмов отклонений от ЛТР показывает, что Pr II сильно сверхионизован в области

Табл. 1

Атомы и ионы, для которых Н.А. Сахибуллиным и его учениками были построены модели атома и разработаны методики не-ЛТР-анализа их спектров

Z	Элемент	Ионы	Авторы
1	водород	H I	Mashonkina et al. (2008) [24]
2	гелий	He I	Сахибуллин, Шаберт (1990) [25]
3	литий	Li I	Машонкина и др. (2002) [26]
6	углерод	C II	Сахибуллин (1987) [27]
		C III	Сахибуллин (1981) [2]
		C IV	Сахибуллин, ван дер Хухт К. (1983) [28]
		N III	Соловьева (1986) [29]
7	азот	N IV	Соловьева (1983) [30]
		Na I	Сахибуллин (1987) [11]
11	натрий	Na I	Сахибуллин (1987) [11]
12	магний	Mg I	Машонкина и др. (1996) [14]
		Mg II	Сахибуллин (1972) [1]
		Mg II	Abia, Mashonkina (2004) [31]
14	кремний	Si I–Si II	Shi, Mashonkina, et al. (2008) [16]
19	калий	K I	Иванова, Шиманский (2000) [12]
20	кальций	Ca I–Ca II	Mashonkina et al. (2007) [15]
		Ca II	Иванова и др. (2002) [32]
26	железо	Fe I	Боярчук и др. (1985) [4]
		Fe I–Fe II	Mashonkina et al. (2011) [5]
38	стронций	Sr II	Белякова, Машонкина (1997) [33]
40	цирконий	Zr I–Zr II	Величко и др. (2010) [34]
56	барий	Ba II	Машонкина, Бикмаев (1996) [35]
59	празеодим	Pr II–Pr III	Mashonkina et al. (2009) [22]
60	неодим	Nd II–Nd III	Mashonkina et al. (2005) [23]
63	европий	Eu II	Машонкина (2000) [36]
		Eu III	Машонкина и др. (2002) [37]

формирования спектральных линий вследствие избыточной фотоионизации низко-возбужденных уровней УФ-излучением, а уровни Pr III перезаселены вследствие притока атомов из нижестоящей стадии ионизации и последующей радиативной накачки возбужденных состояний. Не-ЛТР ведет к сильному ослаблению линий Pr II и противоположному эффекту для линий Pr III.

Заключение

Не-ЛТР-исследования в Казани всегда были мотивированы острыми астрофизическими проблемами, и никогда не ставилась цель пройти по всей таблице Менделеева и изучить формирование линий для как можно большего числа элементов. В этом обзоре невозможно рассказать обо всех исследованиях, выполненных Казанской школой. Поэтому мы приводим табл. 1, где перечисляются все работы, в которых были разработаны оригинальные модели атома и методики не-ЛТР-анализа соответствующих спектральных линий. А полный перечень статей, где разработанные методики были применены для решения самых разных задач, таких как определение параметров звезд, содержания химических элементов от Li до Eu, содержания изотопов Ba, изучение химической эволюции Галактики, специфических механизмов накачки линий He I, N III–N IV и Fe I, гораздо шире.

В мире исследования формирования спектральных линий в неравновесных условиях ведутся с середины 60-х годов XX в. Для некоторых атомов – C III [2], N IV [30], Sr II [33], Zr I–Zr II [34], Nd II–Nd III [23], Pr II–Pr III [22], Eu II [36] и Eu III [37] – модели атома и методика анализа впервые были разработаны

Н.А. Сахибуллиным и его учениками, а для редкоземельных элементов не-ЛТР исследования нигде в мире больше не проводятся. И хотя Казань не была первой для большинства других атомов и ионов, важно отметить, что все методики, используемые Казанской школой, являются оригинальными. Решение не-ЛТР-задачи пока еще не достигло того уровня, чтобы вычислительные программы и модели атома могли использоваться как «черный ящик». Только пройдя все ступеньки от сбора атомных данных до анализа механизмов отклонения от ЛТР, можно добиться успеха. Спектральные наблюдения ставят нам все новые и новые задачи, а значит, не-ЛТР-исследования в Казани будут продолжаться.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Минобразования (№ 02.740.11.0247) и Программы Президиума РАН «Происхождение, строение и эволюция объектов Вселенной» (П-19).

Summary

L.I. Mashonkina. 40 Years of the Kazan Non-LTE School: Achievements and Problems.

This paper reviews the non-local thermodynamic equilibrium (non-LTE) line formation studies of the pioneer of such astrophysical researches in our country N.A. Sakhbullin and his scientific group.

Key words: stellar atmospheres, radiation transfer, statistical equilibrium of atoms, stellar spectra.

Литература

1. Сахибуллин Н.А. Центральные глубины резонансных линий Mg II 2800 Å, рассчитанные при отказе от ЛТР // Астрон. циркуляр. – 1972. – № 733.
2. Сахибуллин Н.А. Интерпретация эмиссии в линии C III 9710 в спектрах горячих звезд // Письма в Астрон. журн. – 1981. – Т. 7. – С. 224–227.
3. Сахибуллин Н.А., Ауэр Л.Х., ван дер Хухт К. Не-ЛТР анализ линий углерода в спектрах горячих звезд. I – Линии C III 4650 и 9710 Å в спектрах O звезд // Астрон. журн. – 1982. – Т. 59. – С. 933–943.
4. Боярчук А.А., Любимков Л.С., Сахибуллин Н.А. Отклонения от локального термодинамического равновесия в атмосферах F сверхгигантов. I – Сверхионизация Fe I // Астрофизика. – 1985. – Т. 22. – С. 339–356.
5. Mashonkina L., Gehren T., Shi J.R., Korn A.J., Grupp F. A non-LTE study of neutral and singly-ionized iron line spectra in 1D models of the Sun and selected late-type stars // Astron. Astrophys. – 2011. – V. 528. – P. A87-1–A87-17.
6. Машонкина Л., Сахибуллин Н.А., Шиманский В.В. Спектральные линии Na I в атмосферах G-карликов в отсутствие ЛТР // Астрон. журн. – 1993. – Т. 70. – С. 372–380.
7. Бикмаев И.Ф., Бобрицкий С., Сахибуллин Н.А. Сверхионизация нейтрального железа в атмосферах субкарликов солнечного типа // Письма в Астрон. журн. – 1990. – Т. 16. – С. 213–222.
8. Nave G., Johansson S., Learner R.C.M., Thorne A.P., Brault J.W. A new multiplet table for Fe I // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1994. – V. 94, No 1. – P. 221–459.
9. Kurucz R.L. Atoms. – 2009. – URL: <http://kurucz.harvard.edu/atoms/2600/>.
10. Боярчук А.А., Губены И., Кубат И., Любимков Л.С., Сахибуллин Н.А. Не-ЛТР эффекты в атмосферах F сверхгигантов. – Часть три – Анализ линий Na I (результаты вычислений) // Астрофизика. – 1988. – Т. 28. – С. 343–353.

11. Сахибуллин Н.А. Линии Na I как индикатор хромосферы у звезд позднего типа // Астрон. журн. – 1987. – Т. 64. – С. 1269–1279.
12. Иванова Д.В., Шиманский В.В. Не-ЛТР анализ формирования линий K I в спектрах A–K звезд // Астрон. журн. – 2000. – Т. 77. – С. 432–444.
13. Шиманский В.В., Бикмаев И.Ф., Галеев А.И., Шиманская Н.Н., Иванова Д.В., Сахибуллин Н.А., Мусаев Ф.А., Галазутдинов Г.А. Наблюдательные ограничения на синтез калия при формировании звезд галактического диска // Астрон. журн. – 2003. – Т. 80, № 9. – С. 816–828.
14. Машонкина Л., Шиманская Н.Н., Сахибуллин Н.А. Анализ формирования линий Mg I у звезд поздних типов в отсутствие ЛТР // Астрон. журн. – 1996. – Т. 73. – С. 212–220.
15. Mashonkina L., Korn A.J., Przybilla N. Statistical equilibrium calculations for neutral and singly-ionized calcium in the atmospheres of late-type stars // Astron. Astrophys. – 2007. – V. 461. – P. 261–271.
16. Shi J.R., Gehren T., Butler K., Mashonkina L., Zhao G. Statistical equilibrium of silicon in the solar atmosphere // Astron. Astrophys. – 2008. – V. 486. – P. 303–311.
17. Frebel A., Aoki W., Christlieb N., Ando H., Asplund M., Barklem P.S., Beers T.C., Eriksson K., Fechner C., Fujimoto M.Y., Honda S., Kajino T., Minezaki T., Nomoto K., Norris J.E., Ryan S.G., Takada-Hidai M., Tsangarides S., Yoshii Y. Nucleosynthetic signatures of the first stars // Nature. – 2005. – V. 434. – P. 871–873.
18. Korn A.J., Richard O., Mashonkina L., Bessell M.S., Frebel A., Aoki W. HE 1327–2326, an unevolved star with $[Fe/H] < -5$. III. Does its atmosphere reflect its natal composition? // Astrophys. J. – 2009. – V. 698, No 1. – P. 410–416.
19. Сахибуллин Н.А., Шиманский В.В. Не-ЛТР эффекты для линий Na I в облучаемых рентгеновским излучением атмосферах звезд // Письма в Астрон. журн. – 2000. – Т. 26. – С. 369–379.
20. Иванова Д.В., Сахибуллин Н.А., Шиманский В.В. Формирование линий Ca II в облучаемых атмосферах // Астрон. журн. – 2004. – Т. 81. – С. 523–540.
21. Ryabchikova T., Piskunov N., Kochukhov O., Tsybalya V., Mittermayer P., Weiss W.W. Abundance stratification and pulsation in the atmosphere of the roAp star boldmath gamma Equulei // Astron. Astrophys. – 2002. – V. 384, No 2. – P. 545–553.
22. Mashonkina L., Ryabchikova T., Ryabtsev A., Kildiyarova R. Non-LTE line formation for Pr II and Pr III in A and Ap stars // Astron. Astrophys. – 2009. – V. 495, No 1. – P. 297–311.
23. Mashonkina L., Ryabchikova T., Ryabtsev A. NLTE ionization equilibrium of Nd II and Nd III in cool A and Ap stars // Astron. Astrophys. – 2005. – V. 441, No 1. – P. 309–318.
24. Mashonkina L., Zhao G., Gehren T., Aoki W., Bergemann M., Noguchi K., Shi J.R., Takada-Hidai M., Zhang H.W. Non-LTE line formation for heavy elements in four very metal-poor stars // Astron. Astrophys. – 2008. – V. 478, No 2. – P. 529–541.
25. Сахибуллин Н.А., Шаберт В.Я. Роль блендирования при формировании синглетных линий гелия в атмосферах Вр звезд // Письма в Астрон. журн. – 1990. – Т. 16. – С. 539–544.
26. Машонкина Л., Шаврина А.В., Халак В., Полосухина Н.С., Цимбал В., Выгонцев В. Влияние пятенной структуры линий редкоземельных элементов и не-ЛТР эффектов на оценки содержания лития для двух roAp звезд // Астрон. журн. – 2002. – Т. 79, № 1. – С. 31–37.

27. Сахибуллин Н.А. Не-ЛТР анализ линий углерода в спектрах горячих звезд. – Резонансные линии и линия C II 4267.2 Å в спектрах В звезд // Астрон. журн. – 1987. – Т. 64. – С. 291–305.
28. Сахибуллин Н.А., ван дер Хухт К. Не-ЛТР анализ линий углерода в спектрах горячих звезд // Астрон. журн. – 1983. – Т. 60. – С. 917–930.
29. Соловьева Л.И. Исследование атмосфер О звезд главной последовательности при отказе от ЛТР // Астрон. журн. – 1986. – Т. 63. – С. 310–316.
30. Соловьева Л.И. Расчеты линий иона NIV при отказе от ЛТР // Астрон. журн. – 1983. – Т. 60. – С. 717–726.
31. Abia C., Mashonkina L. Magnesium abundances in mildly metal-poor stars from different indicators // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2004. – V. 350, No 3. – P. 1127–1140.
32. Иванова Д.В., Сахибуллин Н.А., Шиманский В.В. Метод моделирования формирования линий Ca II в спектрах облучаемых звездных атмосфер // Астрон. журн. – 2002. – Т. 79. – С. 433–448.
33. Белякова Е.В., Машонкина Л.И. Анализ статистического равновесия иона Sr II в атмосферах F, G звезд // Астрон. журн. – 1997. – Т. 74. – С. 601–610.
34. Величко А.Б., Машонкина Л.И., Нильссон Х. Формирование линий Zr I–II в неравновесных условиях звездных атмосфер // Письма в Астрон. журн. – 2010. – Т. 36. – С. 698–713.
35. Машонкина Л., Бижмаев И.Ф. Определение содержания бария у звезд солнечного типа в отсутствие ЛТР. I. Методика неЛТР вычислений // Астрон. журн. – 1996. – Т. 73. – С. 109–118.
36. Машонкина Л. Не-ЛТР анализ формирования линий Eu II в атмосферах звезд солнечного типа // Астрон. журн. – 2000. – Т. 77. – С. 630–640.
37. Машонкина Л., Рябцев А.Н., Рябчикова Т.А. Силы осцилляторов Eu III и содержание европия в Ар звездах // Письма в Астрон. журн. – 2002. – Т. 28. – С. 41–55.

Поступила в редакцию
25.10.10

Машонкина Людмила Ивановна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН, г. Москва.

E-mail: lima@inasan.ru