

Расчет моделей атмосфер и спектров горячих звезд по программе SMART: результаты и проблемы

Сапар А.А., Пооламяэ Р.И., Сапар Л.Ю., Арет А.В.

Тартуская обсерватория, Эстония

Абстракт Программа SMART предусмотрена для вычисления моделей атмосфер горячих звезд любого химического состава и их синтетических спектров, а также для изучения различных физических процессов, протекающих в атмосферах. Преимуществами этой программы мы считаем ее краткость, простоту, удобство использования, а также гибкость в применении к различным задачам и модификациям решаемых проблем. Ограничениями данной версии являются неучет конвекции и молекулярного поглощения, чем и определено применение данной программы лишь к атмосферам с эффективными температурами выше 9000 К. Предлагается новый пан-спектральный метод определения химического состава звездных атмосфер, использующий взвешенную кумулятивную ширину спектральных линий для изучаемого элемента или иона. При помощи этого метода были определены содержания 12-ти элементов в атмосфере химически пекулярной звезды HD 175640, высокодисперсионные спектры которой были получены Кастелли и Хубриг [1]. Наши результаты хорошо согласуются с результатами, полученными Кастелли и Хубриг с использованием программ Куруца [2, 3].

Abstract Sapar A.A., Poolamäe R.I., Sapar L.J., Aret A.V. **Computation of model atmospheres and spectra of hot stars by program SMART: results and problems.** Program SMART has been composed for computation of model atmospheres of hot stars of arbitrary chemical composition and their synthetic spectra, and also for study of different physical processes in stellar atmospheres. Main advantages of SMART are shortness, simplicity, user friendliness and flexibility for study of different physical processes. Lack of subroutines for computing convection and molecular absorption in the present version of SMART means that it is applicable only to effective temperatures exceeding 9000 K. A new pan-spectral method for determination of chemical composition of stellar atmospheres has been proposed. The method is based on a weighted cumulative width of spectral lines for an element or ion studied. We applied this method to find abundances of 12 elements in the atmosphere of chemically peculiar star HD 175640 observed by Castelli and Hubrig [1]. Our results are in good agreement with the results by Castelli and Hubrig, who analyzed observations using software by Kurucz [2, 3].

1. Общая картина моделирования звездных атмосфер и спектров

Для расчета моделей звездных атмосфер, изучения различных физических процессов в них и расчета звездных спектров в настоящее время известны более десятка разновидностей разработанных и работающих программ и вдобавок их модификации, составленные различными авторами [4] – [9]. Эти программы направлены на изучение звезд различных спектральных классов и класса светимости, с учетом скорости их вращения, наличия и конфигурации магнитного поля. Проблемы существенно усложняются, если мы имеем дело с тесными двойными звездами, включая случай, когда одна из компонент является черной дырой.

В число таких программ входит и программа SMART, разрабатываемая нами в течение последних 10 лет. Настоящая версия программы составлена на языке Fortran 90/95. Основными ее преимуществами являются краткость, простота, удобство использования и разнообразие решаемых задач. Примерами изученных нестандартных физических процессов являются диффузионное разделение элементов и их изотопов в атмосферах химически пекулярных (CP) звезд, релаксационное образование не-ЛТР населенностей квантовых состояний и ускорение под действием лучистого давления движущихся сгустков вещества в звездном ветре. Основными физическими ограничениями данной версии программы SMART являются неучет конвекции и молекулярного поглощения. Именно вследствие этого ее применение ограничивается горячими звездами с эффективной температурой выше 9000 К.

Отметим следующие основные математические проблемы, которые могут снизить точность результатов. Во-первых, учет многократного рассеяния света проводится у нас в рамках обычной Λ -итерации, что физически означает итерацию по кратности рассеяния, а не по ускоренной Λ -итерации [10, 11], физический смысл которой труднее воспринимать. Во-вторых, вблизи эддингтоновского предела появляются трудности моделирования атмосферы сверхгигантов. Далее, общей проблемой всех программ расчета моделей атмосфер является то, что атомные данные для спектральных линий и континуумов неполны и часто неточны. Особенно неточными являются поперечные сечения столкновительных процессов, а также суммы по состояниям, которые трудно вычислить вследствие неточности процедуры обреза-

ния высоких состояний. Кроме того, для адекватного учета уширения спектральных линий под действием эффекта Штарка до сих пор отсутствуют компактные и общие формулы.

2. Общая характеристика программы SMART

Программа SMART работает под Windows и Linux, она короткая – имеет около 1100 строк для основных вычислений. Кроме того, в ней имеется примерно 800 строк для операций с многочисленными файлами, содержащими распределение различных физических величин в атмосфере. Более ранняя версия программы кратко описана в работе [12]. Для визуального изучения рассчитанных спектров и сравнения синтетических спектров с наблюдаемыми был составлен графический интерфейс с возможностью выборочно по ионам налагать отметки. При помощи 3 персональных компьютеров, имеющихся в нашем распоряжении, в течение суток можно в среднем вычислить 15 моделей атмосфер и их спектров с разрешением 500000 для области спектра $\lambda = 3000 - 10000 \text{ \AA}$.

Модели атмосфер рассчитываются итеративным методом. При итерациях поток излучения сначала быстро приближается к заданному значению, определяемому эффективной температурой, а затем сходимость замедляется, причем желаемое постоянство потока на уровне 0.2 – 0.1 % достигается за дюжину итераций. В каждой итерации поглощение в спектральных линиях учитывается так же, как при расчете синтетического спектра.

Результаты расчета синтетического спектра приведены к виду, полезному для решения различных задач. Во-первых, вычислен остаточный поток (остаточная интенсивность) излучения, определяемый как отношение потоков линейчатого и непрерывного спектров. Положительными чертами остаточного потока является то, что он не зависит от использованного аргумента (λ или ν) и его можно относительно легко связать с наблюдаемым спектром. Недостатком является то, что вдобавок к нему нужно задавать и непрерывный спектр, файлы которого, к счастью, значительно меньше по объему. Имея файлы остаточного потока и непрерывного спектра, можно модельный синтетический спектр вычислить как произведение этих величин.

Во-вторых, полезно знать, какую оптическую глубину можно приписать формированию любой точки спектра. Для этого удобно вве-

сти понятие монохроматической температуры T_λ , зависящей от длины волны λ . Величину этой температуры мы получаем, считая выходящий из атмосферы поток F_λ равным чернотельному излучению, т. е. функции Планка $B_\lambda(T_\lambda)$. Знание этой величины очень полезно при исследовании атмосфер, где содержание химических элементов может зависеть от оптической глубины. Кроме того, вводя безразмерную спектральную температуру формулой $t_\lambda = T_\lambda/T_{\text{eff}}$, можно все рассчитанные спектры привести к безразмерным единицам, которые приближенно описывают оптическую глубину образования любой точки спектра.

Пример синтетического спектра в единицах безразмерной спектральной температуры, приведенный на верхней панели рисунка 1, демонстрирует, при каких температурах в атмосфере формируется наблюдаемый спектр. Максимальные температуры определены непрерывным поглощением. Поэтому наивысшие значения температуры достигаются между спектральными линиями в области бальмеровского континуума, а самые низкие температуры, соответствующие непрерывному спектру, достигаются в области континуума HeI. На нижней панели рисунка 1 приведено распределение потока излучения внутри атмосферы на различных росселандовских оптических глубинах τ . Рисунок хорошо иллюстрирует основную закономерность распространения излучения в атмосфере: при переходе от глубоких слоев к поверхности происходит смещение потока излучения в длинноволновую сторону. Видна определяющая роль поглощения излучения в континуумах водорода, четко вырисовываются границы континуумов и области формирования наиболее важных спектральных линий в атмосфере.

Мы провели также расчеты потемнения звездного диска к краю, разделив для этого звездный диск на 200 концентрических колец с постоянным шагом по радиусу. Учитывая, что в коротковолновой (виновской) области спектра излучение сильно зависит от температуры, спектральное потемнение звездного диска резко увеличивается к краю. Составлена программа для вычисления спектров вращающихся звезд на основе этих данных (в приближении диска звезды как круга).

Для каталогизирования полученных данных и уменьшения их объема данные приводятся в компактной форме: вычислены логарифмы полученных значений, которые затем соответствующим умножением преобразуются в целые числа. Далее, во всех файлах численное значе-

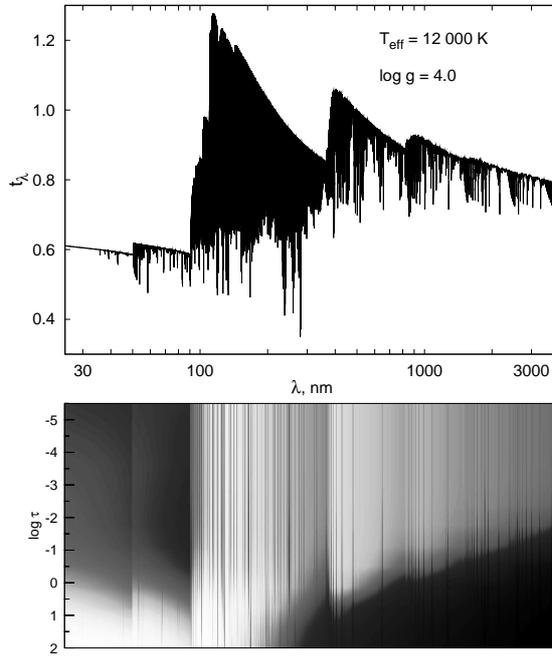


Рис. 1. Верхняя панель: редуцированная спектральная температура B8V звезды, демонстрирующая, при каких температурах в атмосфере формируется наблюдаемый спектр. Нижняя панель: редуцированная спектральная температура внутри атмосферы этой звезды. Темные области соответствуют меньшему, а светлые – большему потоку излучения. Ось длин волн общая для верхней и нижней панели.

ние дано лишь для первой точки (на первой длине волны), а последующие значения представлены в виде целочисленной разности текущей и предыдущей величин. Таким методом мы получаем файлы, которые при zip-упаковке оказываются в несколько раз меньше, чем при прямой zip-упаковке. Без изменения до zip-упаковки остается лишь файл со спектральными линиями, который используется для графического интерфейса. Распаковка полученных файлов проводится соответствующей программой.

3. Релаксационный подход к определению не-ЛТР населенностей атомных состояний частиц

При моделировании атмосфер звезд обычно предполагают, что населенности состояний атомных частиц соответствуют локальному термодинамическому равновесию (ЛТР). Чем больше столкновительные переходы преобладают над радиативными, тем точнее населенности уровней соответствуют состоянию ЛТР. Отклонения от локального термодинамического равновесия возникают во внешних слоях атмосфер звезд, где скорости переходов под воздействием неравновесного (непланковского) поля излучения превосходят скорости столкновительных переходов в этой разреженной плазме. Не-ЛТР населенности квантовых состояний частиц описываются системой уравнений стационарности, означающей равенство скоростей заселения и опустошения каждого состояния. Заселение и опустошение происходит как при столкновениях между частицами, так и при спонтанных и индуцированных переходах под действием поля излучения. Для нахождения отклонений от ЛТР нужно решать систему уравнений стационарности. Это, однако, очень сложная задача вследствие нескольких причин. Во-первых, система уравнений стационарности является нелинейной. Во-вторых, эта система громоздкая, поскольку для каждого атомного состояния имеется свое уравнение баланса между заполнением и опустошением уровня. В-третьих, поле излучения связывает между собой все оптические глубины, вследствие чего система уравнений стационарности становится нелокальной. Для решения этой системы нужно провести линеаризацию уравнений, что является трудоемкой и громоздкой операцией. Кроме того, при этом приходится использовать разные упрощения и приближения. Неминуемым при любом подходе является, разумеется, знание всех вероятностей переходов, как столкновительных, так и радиативных.

Задача определения не-ЛТР населенностей значительно упрощается, если считать, что начальное состояние является равновесным и неравновесные населенности образуются путем релаксации, т. е. если получать неравновесные населенности атомных состояний как асимптотическое решение уравнений нестационарности. При таком подходе отпадает процедура линеаризации, заменяясь проблемой интегрирования по времени. Подготовка исходных данных здесь та же самая, как и в случае определения не-ЛТР населенностей из системы урав-

нений стационарности. Первым делом является выбор модели атома, т. е. составление схемы всех учитываемых переходов (диаграммы Гротриана). Затем надо составить массив исходных данных с нужными спектральными интервалами, а также массив для учета не-ЛТР коэффициентов (коэффициентов Мензеля).

Основной добавочной подпрограммой программы SMART при релаксационном подходе является та, где на основе вычисленного поля излучения и выражений для вероятностей столкновений находят скорости заселения и опустошения всех состояний, разница которых и дает временную производную изменения не-ЛТР населенностей квантовых состояний частиц. Конечно, численное интегрирование является трудоемким для компьютера, но для программиста это значительно проще чем линеаризация уравнений стационарности. Проведенные нами расчеты для сильно упрощенной модели иона С II показали, что процесс решения хорошо сходится.

Задачу нахождения не-ЛТР населенностей можно упростить введением суперсостояний, в которые включают энергетически близкие состояния, между которыми столкновительные переходы настолько превосходят излучательные, что все они имеют одинаковые отклонения от ЛТР, т. е. одни и те же коэффициенты Мензеля. Следует отметить, что высоковозбужденные состояния определенного иона и основное состояние следующего иона можно включить в состав одного суперсостояния.

4. Проблема образования звездных ветров

Как известно, звездные атмосферы являются источниками звездного ветра. Однако спусковой механизм звездного ветра до сих пор полностью не выяснен. С проблемой образования звездных ветров связан вопрос о возможной роли радиационного ускорения движущихся в атмосфере звезды сгустков вещества. При вычислении этого ускорения нужно, в отличие от обычного вычисления синтетического спектра и лучистого давления, учесть еще и наличие доплеровского смещения спектральных линий вследствие радиальной скорости. Проведенные расчеты показали, что наличие подобных движущихся сгустков вещества может служить спусковым механизмом звездного ветра.

Особую роль для звездного ветра играет звуковая скорость. Когда сверхзвуковой звездный ветер уже сформирован, тогда в дозвуко-

вой области звездной атмосферы действует режим утечки, поскольку в сверхзвуковой области звездного ветра даже обратно распространяющиеся звуковые волны плотности фактически удаляются от звезды. Конечно, и здесь было бы более корректно исходить из заданного релаксационного режима для уравнений газодинамики звездной атмосферы и рассматривать эволюционный процесс звездного ветра. Этот процесс, по-видимому, часто приводит к нестационарному истечению вещества, т. е. звездный ветер неустойчив. Самосогласованным решением задачи звездного ветра можно определить стационарное или статистически среднее радиальное распределение скорости звездного ветра и найти, в какой степени это соответствует эмпирическому закону, установленному Ламерсом [13]. Притом конечным результатом должна быть самосогласованная модель звездной атмосферы вместе со звездным ветром. Важные шаги в этом направлении сделаны программами CMFGEN [7] и FASTWIND [9].

5. Расчет спектров вращающихся и тесных затменно-переменных двойных звезд

Как было отмечено выше, при помощи программы SMART можно вычислить потемнение звездного диска к краю в предположении сферичности звезды и плоскопараллельности ее атмосферы. Потемнение диска звезды от центра к краю сильно усиливается с переходом в коротковолновую (виновскую) область спектра. На рисунке 2 изображено потемнение диска звезды в переходной зоне серии бальмеровских линий водорода и бальмеровского континуума. Составлена добавочная программа, при помощи которой на основе этих данных можно вычислить спектры вращающихся звезд, а также монохроматические кривые блеска для затменно-переменных звезд, задавая отношение радиусов компонент двойной звезды, отношения их радиусов к радиусу орбиты, а также угол наклона орбиты. Ограничением является то, что не учитываются взаимный нагрев и деформация звездного диска у тесных двойных звезд. В этих расчетах в качестве исходных данных используются zip-файлы потемнения звездного диска к краю.

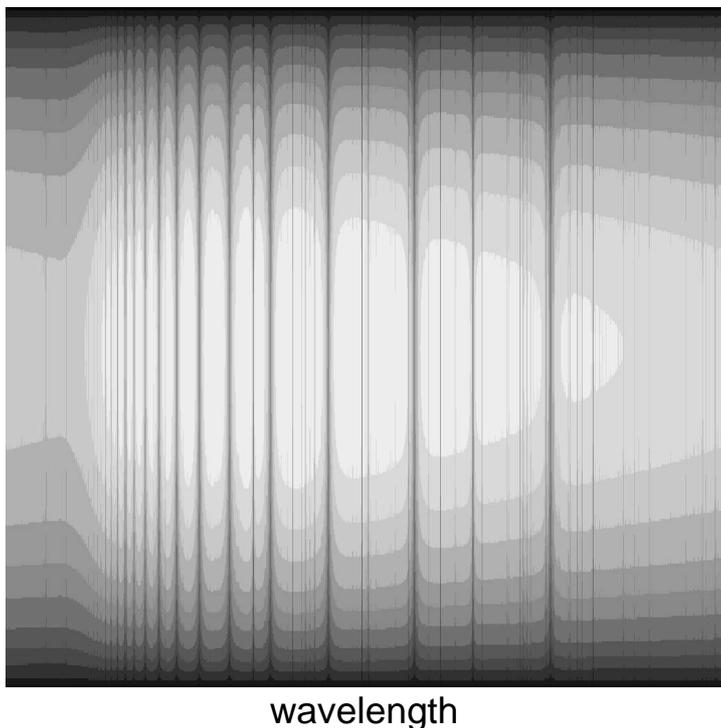


Рис. 2. Картина потемнения диска звезды в переходной зоне серии бальмеровских линий водорода и бальмеровского континуума.

6. Схема расчетов программой SMART

Теперь, после ознакомления с общими блоками программы SMART, остановимся кратко на схеме проведения расчетов.

1. Вводят начальные данные, которые определяют решаемую задачу, в том числе, основные параметры рассматриваемой модели атмосферы, различные дискриминаторы и спецификаторы, а также массив данных, определяющих начальные и конечные длины волн для проведения расчетов по заданным отрезкам спектра.

2. Вводят данные для исходной модели атмосферы и данные для

поперечных сечений непрерывного поглощения. Притом, число задаваемых оптических глубин можно увеличивать, деля каждый вычисленный атмосферный слой на заданное число и определяя модельные данные для них интерполяцией в массивах исходных данных. Если пользоваться исходными модельными данными Куруца [14], то стабильность результатов расчета обеспечивается утроением числа атмосферных слоев (24 слоя на 1 dex).

3. На основе полученных исходных данных при помощи уравнения Саха–Больцманна вычисляют ЛТР населенности связанных и свободных атомных состояний, а затем соответствующие значения коэффициента непрерывного поглощения для рассматриваемого участка спектра и для всех оптических глубин. При этом, расчеты непрерывного спектра можно провести с более длинным в заданное число раз шагом, чем расчеты линейчатого спектра, используя затем интерполяцию на все нужные длины волн. Таким путем можно примерно на 10 % сократить время расчетов. Вычисление коэффициента непрерывного поглощения до вычисления линейчатого спектра целесообразно потому, что при вычислении коэффициента поглощения в спектральных линиях обрезание крыльев проводится, когда относительный вклад линии становится менее заданного малого числа, например 10^{-4} .

4. Вводятся данные о коэффициенте поглощения в спектральных линиях для рассматриваемого спектрального интервала, включая соседние линии, которые могут дать вклад в этот интервал. В качестве основного банка данных использовались данные Куруца [3]. Для функции Фойгта у нас составлена простая, короткая и быстродействующая подпрограмма. Что касается штарковского уширения линий водородоподобных ионов, то его учет пока сделан в программе SMART довольно грубо. Этой проблемой мы занимаемся и надеемся в будущем найти удовлетворительное решение.

5. Далее, имея полный коэффициент непрозрачности вещества звездной атмосферы, выполняем расчет переноса излучения в атмосфере и вычисляем поток излучения во всех атмосферных слоях. Расчет поля излучения мы проводим, используя функцию источников, определенную линейной интерполяцией во внешних оптически тонких атмосферных слоях и полиномом второго порядка в оптически толстых внутренних слоях. Хотя не всегда эти квадратные полиномы имеют нужную точность, ее всегда можно достичь отмеченным выше увеличением числа атмосферных слоев. Поле излучения в обоих направ-

лениях в любой точке разделения слоев вычисляется как сумма соответствующих эддингтоновских моментов со всех атмосферных слоев. Учет многократного рассеяния фотонов как в спектральных линиях, так и на свободных электронах мы провели обычной Λ -итерацией, которая продолжалась до тех пор, пока для всех оптических глубин не достигалась точность, при которой получаемая относительная поправка к функции источников становилась ниже заданного малого численного значения. Как известно, этим методом не всегда достигается высокая точность, которую можно получить применением метода ускоренной Λ -итерации (метода ALI). На этом этапе можно провести и расчет переноса излучения в заданных направлениях, нужный для нахождения потемнения диска звезды к краю. Используемый нами выбор кругов на диске был описан выше.

6. Для определения остаточного потока излучения нужно провести еще добавочно цикл вычислений (этапы 3 – 5) без учета спектральных линий.

7. Для итерационного исправления модели атмосферы нужно, исходя из требования постоянства потока излучения и уравнения гидростатического равновесия, определить в заданных точках поправки температуры, электронного давления и соответствующую поправку степени ионизации. В целях упрощения процедуры итерационного исправления модели атмосферы мы считали колонковую массу фиксированной величиной.

7. Диффузионная сегрегация химических элементов и их изотопов

В программу SMART включено решение еще трех задач. Наиболее разработанной из них является расчет диффузионной сегрегации химических элементов при одновременном действии силы тяжести, силы лучистого давления и светоиндуцированного дрейфа (СИД). При этом разделение изотопов происходит лишь под действием СИД. В настоящей версии программы SMART осуществлена возможность расчета диффузионной сегрегации лишь для одного заданного химического элемента.

Для адекватного расчета эффекта СИД нужно составить и использовать добавочный массив исходных данных по сверхтонкому и

изотопическому расщеплению спектральных линий. Сверхтонкое расщепление вызвано взаимодействием магнитного дипольного момента и электрического квадрупольного момента ядра с внешней электронной оболочкой. Изотопическое расщепление у тяжелых элементов вызвано преимущественно эффектом объема, т. е. перекрытием волновых функций электрона и ядра. Характерной чертой этого взаимодействия является то, что поскольку плотность вещества во всех ядрах приблизительно одинакова, то объем ядра пропорционален числу частиц в нем. Согласно квантовой механике смещение энергии электронных состояний во внешней оболочке происходит всегда в сторону меньшей энергии связи, причем с добавлением нейтрона энергия связи уменьшается. Вследствие эффекта объема линии изотопов с большим атомным весом смещаются в сторону более длинных волн. У легких элементов превалирует зависящий от массы ядра изотопический эффект. Сущность этого эффекта заключается в том, что эффективные радиусы боровских электронных орбит зависят от так называемой редуцированной массы и тем самым от массы ядра. Итак, чем больше масса ядра, т. е. чем больше нуклонов в ядре, тем больше и энергия связи. Этот эффект называется эффектом массы. Вследствие эффекта массы линии изотопов с большим атомным весом смещаются в сторону более коротких длин волн. Вклады эффекта объема и эффекта массы в изотопическое смещение спектральных линий, как правило, направлены в противоположные стороны.

Отличие расчета динамики диффузионного разделения химических элементов и их изотопов от описанного выше стандартного расчета начинается уже с массивов исходных данных. Для адекватного расчета СИД нужно взять очень большое спектральное разрешение, согласно нашим оценкам примерно 5 миллионов, что соответствует доплеровской скорости 60 м/сек. Поэтому для расчета диффузионного разделения нужно задавать таблицу лишь тех отрезков спектра, в которых находятся спектральные линии изучаемого элемента. Исходными данными задается и число шагов по времени, необходимое для изучения эволюционного процесса. Более детально результаты и проблемы диффузионного разделения изотопов изложены в другой нашей статье в данной книге.

8. Панспектральный метод определения химического состава звездных атмосфер

Одной из основных целей использования программы SMART является определение основных параметров звезд. В течение многих десятилетий были разработаны различные методы определения параметров звездных атмосфер. При этом основными тенденциями развития были повышение точности их определения, для чего разрабатывались новые методы анализа спектров, и уменьшение роли ручной работы астрономов при помощи автоматизации процесса обработки спектров и проведения нужных расчетов. Отличный обзор этих усилий и результатов дан в монографии Сахибуллина [15]. К настоящему времени достигнуты большие успехи в области астроспектроскопии, благодаря находящимся в эксплуатации большим высококачественным телескопам, оснащенным приемной аппаратурой в виде высокодисперсионных эшелле-спектрографов и эффективных светоприемников CCD. В связи с быстрым ростом компьютерных мощностей и доступом через интернет к высокодисперсионным и низкошумовым панспектральным наблюдениям в видимой и УФ области назрела необходимость разработки новых методов определения параметров и химического состава звезд. Определенный вклад в этом направлении попытались дать и мы, предложив новый панспектральный метод определения химического состава звездных атмосфер.

8.1. Основные формулы

Предложенный метод основан на введенной нами взвешенной кумулятивной ширине спектральных линий изучаемого элемента

$$Q_{\lambda} = \int_{\lambda_0}^{\lambda} \left| \frac{dR_{\lambda}}{dZ} \right| (1 - R_{\lambda}) d\lambda, \quad (28)$$

где R_{λ} – остаточный поток (интенсивность) излучения и Z – относительная распространенность элемента, определяемая формулой $Z = \log(N_{elem}/N_{tot})$. Производную dR_{λ}/dZ можно интерпретировать как весовую функцию, которая отлична от нуля только на тех спектральных интервалах, где поток чувствителен к изменению содержания исследуемого элемента. Отметим, что этот метод преобразуется в метод

определения суммарной эквивалентной ширины спектральных линий, если при ненулевом Q_λ считать, что $|dR_\lambda/dZ| = 1$.

Величину производной dR_λ/dZ мы нашли из синтетических спектров по формуле

$$\frac{dR_\lambda}{dZ} = \frac{R_\lambda^+ - R_\lambda^-}{Z^+ - Z^-}, \quad (29)$$

где R^+ и R^- – остаточные потоки излучения, соответствующие атмосферам с содержанием исследуемого элемента $Z^+ = Z + \delta Z$ и $Z^- = Z - \delta Z$, причем в наших расчетах $\delta Z = 0.1$ или $\delta Z = 0.2$.

Введем производную

$$\frac{dQ_\lambda}{dZ} = \frac{Q_\lambda^+ - Q_\lambda^-}{Z^+ - Z^-}, \quad (30)$$

где $Z^+ - Z^-$ – разность содержания элемента Z и $Q_\lambda^+ - Q_\lambda^-$ – соответствующая разность величин Q_λ , найденная по синтетическим спектрам. Теперь мы можем определить поправку ΔZ к химическому содержанию рассматриваемого элемента из уравнения

$$\frac{dQ_\lambda}{dZ} \Delta Z = Q_\lambda^o - Q_\lambda^c. \quad (31)$$

Здесь Q_λ^c определена по синтетическому спектру, а Q_λ^o – по наблюдаемому спектру с использованием найденной по синтетическим спектрам производной (29).

Предложенный метод был также проверен при определении эффективной температуры и гравитационного ускорения звездных атмосфер – вместо производной остаточного потока по содержанию химического элемента была использована производная по искомому параметру. Отметим, что для анализа особенностей спектров разных элементов можно получить их суммарные профили путем упорядочения по величине остаточного потока.

8.2. Определение содержания химических элементов при помощи нового метода

Описанным методом был проанализирован спектр химически пекулярной HgMn звезды HD175640, и найдены содержания 12 элементов по ультрафиолетовой и визуальной областям спектра. Высокодисперсионный UVES спектр звезды HD 175640 был получен Каstellли

и Хубриг [1] на 8-метровом телескопе Европейской Южной Обсерватории. Они нашли параметры звезды ($T_{\text{eff}}=12000$ К, $\log g=3.95$ и $V \sin i=2.5$ км/с) и определили ее химический состав.

Наблюдаемый спектр охватывает спектральный интервал $3000 - 10000 \text{ \AA}$, имеет в видимой области спектральное разрешение 110000 и в ультрафиолетовой области – 90000 и отношение сигнала к шуму $200 - 400$. Из-за наличия теллурических линий (обусловленных поглощением в атмосфере Земли) для анализа химсостава непригодной оказалась область $8000 - 10000 \text{ \AA}$. Кроме того, вследствие наличия пробелов между спектральными порядками пропадают некоторые участки спектра.

Мы провели вычисления спектра HD175640, используя в качестве исходных T_{eff} , $\log g$ и химсостав, найденные Каstellи и Хубриг [1]. Спектральное разрешение в наших расчетах 500000 , что соответствует модельным расчетам Каstellи и Хубриг, выполненным при помощи программы SYNTHE [3]. Кроме того, для лучшей сравнимости результатов мы пользовались и их файлом спектральных данных. Вычисленный нами спектр оказался в хорошем согласии с наблюдаемым спектром. Примеры для узких участков ультрафиолетового и видимого спектра приведены на рис. 3. Приведенный здесь синтетический спектр вычислен с использованием уточненного при помощи панспектрального метода содержания некоторых элементов. Для наилучшего согласования наблюдаемого и вычисленного спектра мы подобрали подходящий параметр гауссовского уширения спектра и уровень обрезания остаточного потока для устранения шума.

Предложенный метод в принципе применим для изучения содержания любого элемента. Для одного итерационного шага определения поправок содержания одного элемента проводится расчет трех моделей атмосферы, а именно, при исходном, увеличенном и уменьшенном содержании этого элемента. Таким образом, для определения химсостава надо провести вычисление спектра для многих моделей атмосфер. Картина первой итерации при определении поправки к содержанию хрома предложенным методом проиллюстрирована на рис. 4. Мы выбрали для анализа содержания 12 элементов, богатых спектральными линиями в исследуемом спектре. Исходные содержания и результаты расчета за два итерационных шага приведены в табл. 1. В табл. 2 приводится сравнение наших результатов с результатами Каstellи и Хубриг [1]. Как видно, согласие можно считать довольно хорошим.

Используя введенную нами взвешенную кумулятивную ширину,

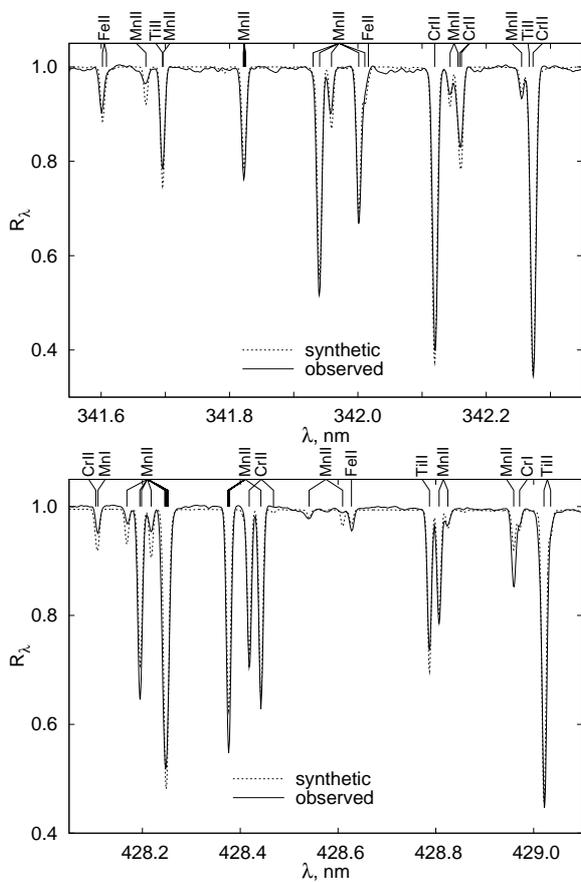


Рис. 3. Сравнение остаточных потоков синтетического и наблюдаемого спектров в УФ и видимой областях спектра, содержащих все хорошо отождествленные линии различных атомов и ионов.

удалось также показать, что содержание изученных сильно избыточных тяжелых элементов в атмосфере звезды HD175640 увеличивается во внешних слоях атмосферы.

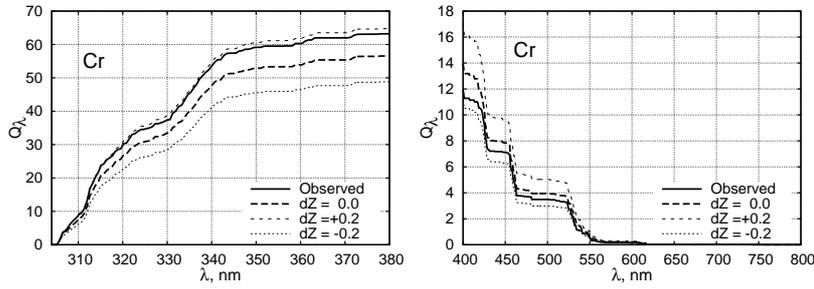


Рис. 4. Взвешенная кумулятивная ширина Q_λ для хрома. Четко видно хорошее согласие хода Q_λ при трех содержаниях хрома (шаг - 0.2 dex) с полученным из наблюдаемого спектра. Разница поправок для УФ и видимого спектра объясняется повышенным содержанием хрома в поверхностных слоях, где образуется УФ спектр.

Таблица 1. Итерационные поправки к содержанию элементов в единицах $Z = \log(N_{elem}/N_{tot})$.

	Solar	Z_0		Correction 1		Z_1		Correction 2		Z_2	
		UV	Vis	UV	Vis	UV	Vis	UV	Vis		
Mn	-6.65	-4.23	+0.35	+0.15	-3.88	-4.08	-0.02	0.00	-3.90	-4.08	
Ti	-7.02	-5.67	+0.30	-0.05	-5.37	-5.72	-0.03	+0.01	-5.40	-5.71	
Cr	-6.37	-5.27	+0.16	-0.14	-5.11	-5.41	-0.02	0.00	-5.13	-5.41	
Fe	-4.53	-4.79	+0.06	-0.07	-4.73	-4.86	-0.03	0.00	-4.76	-4.86	
Y	-9.80	-6.66	+0.16	-0.10	-6.50	-6.76	-0.04	0.00	-6.54	-6.76	
Mg	-4.46	-4.67	+0.06	+0.13	-4.61	-4.54	-0.04	-0.01	-4.65	-4.55	
Si	-4.49	-4.65	-	+0.43	-	-4.22	-	-0.06	-	-4.28	
Ca	-5.68	-5.48	-0.06	0.00	-5.54	-5.48	-0.04	+0.04	-5.58	-5.44	
O	-3.21	-3.18	-	+0.06	-	-3.12	-	+0.01	-	-3.11	
S	-4.71	-5.24	-	+0.58	-	-4.66	-	-0.02	-	-4.68	
Yb	-10.96	-7.66	+0.50	-0.38	-7.16	-8.04	-0.16	-0.13	-7.32	-8.17	
Ni	-5.79	-6.09	+0.24	-0.06	-5.85	-6.15	-0.06	-0.07	-5.91	-6.22	

9. Заключение

В настоящее время для моделирования атмосфер звезд и вычисления их спектров астрофизики используют около десятка программ, резко различающихся по длине и сложности, а также по требованиям, предъявляемым к компьютерам. Часть из них ориентирована на изучение звезд определенных спектральных классов, чем достигает-

Таблица 2. Поправки к содержанию элементов $[N/N_{\odot}]$ для HD175640.

	Кастелли и Хубриг [1]						Эта статья	
	UV			Vis			UV	Vis
	ion I	ion II	ion III	ion I	ion II	ion III		
Mn	+2.47	+2.40	-	+2.46	-	-	+2.75	+2.57
Ti	-	+1.43	-	-	+1.30	-	+1.62	+1.31
Cr	+1.19	+1.03	-	+1.13	+0.96	-	+1.24	+0.96
Fe	-0.36	-	-	-0.21	-0.30	-	-0.23	-0.33
Y	-	+3.38	-	-	+3.01	-	+3.26	+3.04
Mg	-	-	-	+0.18	-0.25	-	-0.19	-0.09
Si	-	-	-	-	-0.23	-0.09	-	+0.21
Ca	-	-0.15	-	+0.42	+0.06	-	+0.10	+0.24
O	-	-	-	+0.03	-	-	-	+0.10
S	-	-	-	-	-0.41	-	-	+0.03
Yb	-	+3.14	+3.66	-	+2.76	-	+3.64	+2.79
Ni	-	-0.22	-	-	-0.35	-	-0.12	-0.43

ся упрощение программы. Программа SMART принадлежит именно к последнему типу. Она предусмотрена для вычисления моделей атмосфер и синтетических спектров горячих (O, B и A) звезд, а также для изучения различных физических процессов, протекающих в их атмосферах. Особенности этой программы являются ее краткость и простота, нетребовательность к компьютерным мощностям, а также гибкость в применении к различным астрофизическим задачам. Ограничениями программы SMART являются неучет конвекции и молекулярного поглощения, вследствие чего она применима лишь для исследования звездных атмосфер с эффективным температурами выше 9000 K.

Для анализа наблюдаемых спектров нами предлагается новый пан-спектральный метод определения основных параметров звездных атмосфер, в первую очередь, их химического состава, эффективной температуры и гравитационного ускорения. Поскольку этот метод позволяет использовать все линии данного элемента, то его, по-видимому, целесообразно использовать для изучения содержания элементов, богатых линиями в изучаемой области спектра звезды. Подтверждение этому мы получили, определив содержания 12 элементов в атмосфере химически peculiarной звезды HD 175640. Достоинством предложенного метода является адекватный учет вклада блендированных линий.

Мы благодарны Эстонскому Научному Фонду за финансовую поддержку грантом ETF 6105.

Список литературы

1. Castelli F., Hubrig S. 2004, *A&A*, 425, 263
2. Kurucz R. 1997, in *The 3rd Conf. on Faint Blue Stars*, ed. A. G. D. Philip, J. Liebert, R. A. Saffer (Schenectady: L. Davis Press), 33
3. Kurucz R. 1993, *SYNTHE Spectrum Synthesis Programs and Line Data*, CD-ROM, No. 18
4. Kurucz R. 2005, *Mem. S. A. It.*, 8, 14
5. Gustafsson B., Bell R.A., Eriksson K., Nordlund A. 1975, *A&A*, 42, 407
6. Hubeny I., Lanz T. 1995, *ApJ*, 439, 875
7. Hillier D.J., Miller D. L. 1998, *ApJ*, 496, 407
8. Santolaya-Rey A. E., Puls J., Herrero A. 1997, *A&A*, 323, 488
9. Puls J., Urbaneja M. A., Venero R., et al. *A&A*, 435, 669
10. Rybicki G.B., Hummer D.G. 1991, *A&A*, 245, 171
11. Rybicki G.B., Hummer D.G. 1992, *A&A*, 262, 209
12. Sapar A., Poolamäe R. 2003, *ASP Conference Series*, 288, 95
13. Lamers H.L.G.L.M., Cassinelli J.P. 1999, *Introduction to stellar winds*, Cambridge University Press, Cambridge
14. Kurucz R. 1993, *ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km s⁻¹ grid*, CD-ROM, No. 13
15. Сахибуллин Н. А. 2003, *Методы моделирования в астрофизике. II. Определение фундаментальных параметров звезд. ФЭН*