

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке ФГАОУ ВПО
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России
Б.Н.Ельцина», кандидат физико-
математических наук, доцент

В.В.Кружаев

« 21 » *апрель* 2015 г.



**Методика оценки основных параметров звезд и
межзвездной среды в областях звездообразования с
помощью количественной автоматической спектроскопии**

Директор Коуровской астрономической
обсерватории, кандидат физико-математических
наук, старший научный сотрудник

П.Е.Захарова

г. Екатеринбург, 2015 г.

Содержание

Основные параметры звезд и межзвездной среды	3
Методика оценки основных параметров звезд	3
Оценка проекции скорости вращения.....	3
Оценка эффективной температуры, ускорения свободного падения и скорости микротурбулентности	6
Расчет моделей звездных атмосфер и синтетических спектров	8
Оценка параметров межзвездной среды.....	9
Список использованных источников литературы	11

Основные параметры звезд и межзвездной среды

Основными параметрами, которыми определяется влияние звезды на окружающую среду и которые необходимо знать для определения химического состава звезды, являются эффективная температура T_{eff} , ускорение свободного падения g (чаще всего для удобства используется десятичный логарифм от g , $\log g$) и параметры звездного ветра (истечения вещества звезды в межзвездное пространство). Также при использовании метода моделей звездных атмосфер для оценки параметров звезды важно знать значение проекции скорости вращения звезды, от которого зависит точность оценки значения T_{eff} . Для определения основных параметров звезд в основном используется сине-фиолетовая часть оптического спектра (3900–5000 Å), где находятся линии поглощения водорода, гелия, кремния и других металлов.

Основными параметрами межзвездного газа являются его температура и плотность. Значительный интерес на данный момент представляет изучение распределения этих параметров на относительно малых пространственных масштабах. Подобные исследования возможно проводить по изучению молекулярных и атомарных линий поглощения в оптических спектрах ярких звезд-беглецов — звезд, пространственная скорость движения которых значительно превосходит дисперсию скоростей звезд Галактического диска.

Методика оценки основных параметров звезд

Оценка проекции скорости вращения

Формирование, структура и эволюция звезды во многом зависит от скорости ее вращения и определение данного параметра необходимо для

того, чтобы понять физику массивных звезд. Существуют несколько методов оценки проекции скорости вращения:

- определение полной ширины на половине максимума профиля наблюдаемой линии [1];
- метод кросс-корреляции наблюдаемого спектра и спектра другой звезды с минимальной скоростью вращения [2];
- сравнение профилей линий в наблюдаемом и синтетических спектрах, свернутых с соответствующими функциями уширения;
- Фурье-преобразование профилей спектральных линий [3].

Первые два способа позволяют получить значения проекции скорости вращения для огромного количества звезд с различными классами светимости, однако в них не учитываются другие механизмы уширения профилей линий, такие как макротурбулентность.

Далее более подробно будет описан метод, основанный на Фурье-преобразовании. Этот метод применим для спектров высокого спектрального разрешения ($R > 10000$) и с достаточно большим отношением сигнала к шуму ($\text{SNR} > 50$) и позволяет довольно легко оценить проекцию скорости вращения независимо от других механизмов, влияющих на профиль спектральной линии. Для оценки проекции скорости вращения можно использовать линии металлов и нейтрального гелия He I. В случае малых скоростей вращения приоритет отдается линиям металлов, так как профиль этих линий уширен в основном за счет вращения звезды. В профилях линий He I могут играть существенную роль другие механизмы уширения, что наиболее заметно при низких значениях проекции скорости вращения. На рисунке 1 представлено преобразование профиля линии O III λ 5592. При использовании метода оценка производится путем определения частоты первого нуля Фурье-образа линии, которая связана с проекцией скорости вращения формулой:

$$\frac{\lambda}{c} V \sin i \sigma_1 = 0.660, \quad (1)$$

где λ – длина волны в \AA , σ_1 – частота нуля Фурье-образа линии в \AA^{-1} .

Однако, первый нуль Фурье-образа спектральной линии не всегда соответствует скорости вращения звезды (особенно в случае большой скорости микротурбулентности). Поэтому желательно оценивать проекцию скорости вращения по обоим нулям (если можно выделить второй) Фурье-образа одной и той же линии, используя одну и ту же формулу. В случае, если для всех выбранных спектральных линий оценки проекции скорости вращения, полученные по первому нулю близки, то это означает, что первый нуль всех этих линий соответствует вращению звезды и именно его нужно использовать для окончательной оценки.

Неточность в оценке $V \sin i$ может привести к довольно большой ошибке в определении эффективной температуры [1].

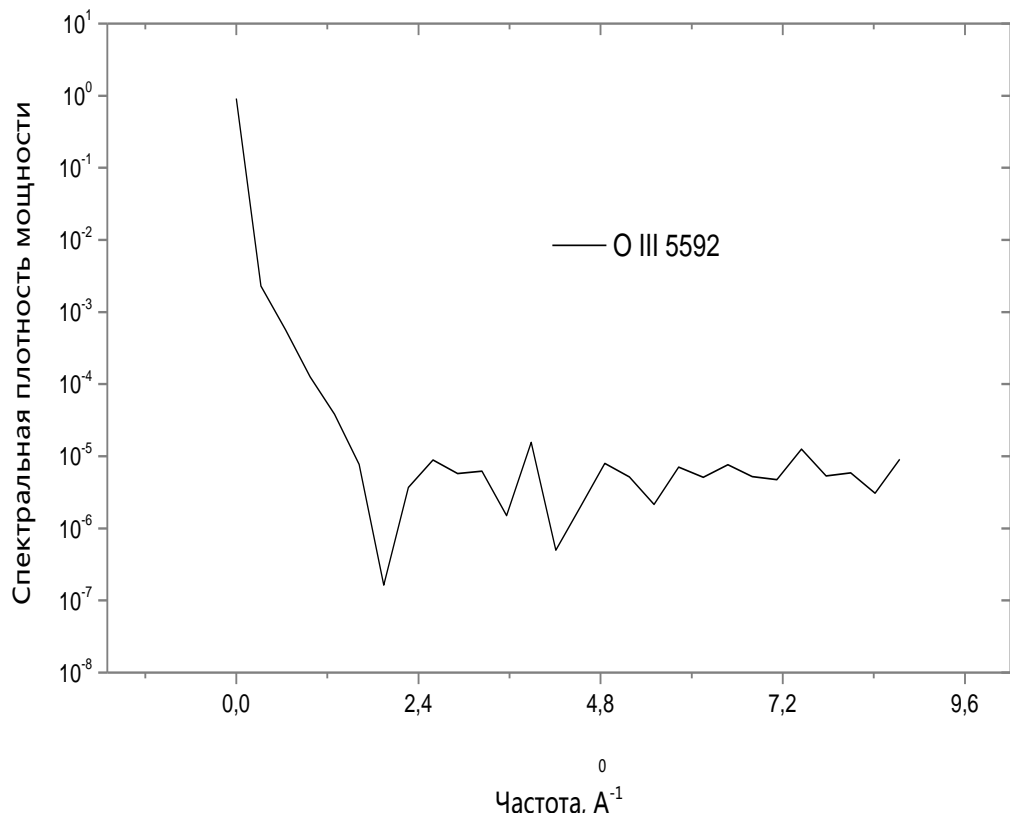


Рисунок 1 — Фурье-образ линии O III λ 5592

Оценка эффективной температуры, ускорения свободного падения и скорости микротурбулентности

Определение основных физических параметров заключается в сравнении наблюдаемого спектра с синтетическим, таким образом данная задача является задачей оптимизации, так как нужно найти наилучшее соответствие между наблюдаемым и синтетическим спектрами. Для решения этой задачи можно использовать метод автоматической количественной спектроскопии представленный далее.

Для начала необходимо определить значения эффективной температуры и ускорения свободного падения, которые соответствуют спектральному классу объекта, по одной из известных калибровок (например, [4]). Первоначальный химический состав можно принять солнечным, скорость макротурбулентности — равной нулю, а скорость микротурбулентности равной той скорости, для которой рассчитана сетка моделей атмосфер.

Для первоначальной оценки основных физических параметров звезды необходимо использовать модели звездных атмосфер (например, [5]). На основе параметров сетки моделей звездных атмосфер и начальных значений параметров нужно выбрать область эффективных температур и ускорений свободного падения, которая будет исследована. В выбранной области параметров на основе моделей атмосфер необходимо рассчитать синтетические спектры. Расчет спектров нужно проводить с учетом лучевых скоростей линий и проекции скорости вращения, полученных ранее. Для оценки параметров необходимо из набора синтетических спектров определить спектр наилучшим образом подходящий под наблюдаемый спектр, сравнивая профили линий. Для оценки следует использовать линии металлов, линии He и крылья линий водорода.

Степень соответствия спектров оценивается по минимуму значения величины χ^2 :

$$\chi^2 = \frac{1}{N_L} \sum_L \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_L \frac{(F_i^{\text{obs}} - F_i^{\text{teo}})^2}{\sigma_L^2}, \quad (2)$$

где w_L – вес спектральной линии L ; F_i^{obs} – нормализованный поток в i -ой точке профиля спектральной линии L , полученной из наблюдений; F_i^{teo} – нормализованный поток в i -ой точке профиля линии L в синтетическом спектре; N – число отсчетов в профиле линии спектра, полученного из наблюдений; N_L – число спектральных линий, которые использовались для оценки параметров звезды; σ_L – обратное отношение сигнала к шуму спектральной линии L . Пример распределения величины χ^2 представлен на рисунке 2.

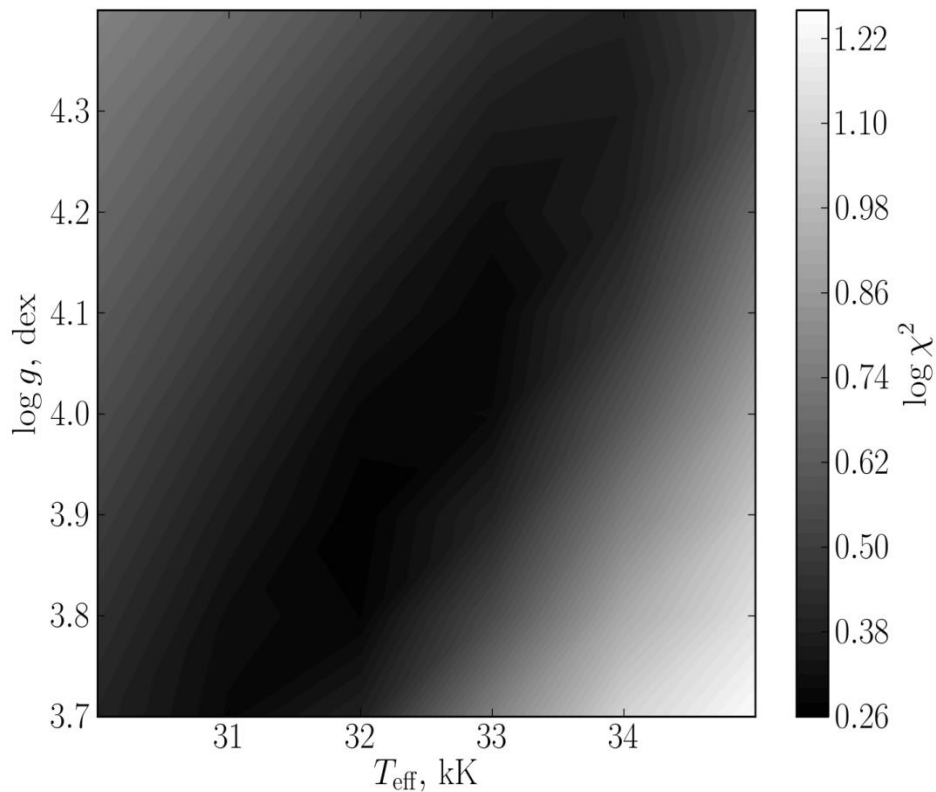


Рисунок 2 — Распределение величины χ^2 в плоскости $T_{\text{eff}} - \log g$, полученное при оценке параметров звезды AE Aur

На основе полученных первоначальных результатов рассчитывается синтетический спектр, с помощью которого уточняется и исправляется модель континуума. Уточненная модель континуума затем опять используется для оценки основных параметров, тем самым достигается лучшая точность полученных результатов.

Так же оценку основных физических параметров и их ошибок можно производить с помощью диагностической диаграммы $T_{\text{eff}} - \log g$. Пример использования подобной методики представлен в работе [6]. С помощью подобных диаграмм варьируются два основных параметра (для каждого значения T_{eff} подбираются значения $\log g$ таким образом, чтобы обеспечить наилучшее совпадение синтетического профиля с наблюдаемым) отдельно для каждой спектральной линии, при этом необходимо учитывать, что каждая линия имеет свой вес. Та часть диаграммы, на которой линии сходятся, соответствует наилучшему совпадению профилей.

Расчет моделей звездных атмосфер и синтетических спектров

Модели атмосфер — таблицы, в которых представлена зависимость основных физических параметров от глубины. В них приводятся линейная протяженность по глубине, температура на данной глубине, электронное давление на данной глубине и др.

На сегодняшний день существует довольно много программных кодов для расчета моделей звездных атмосфер. В том, числе разработаны программные коды, в которых при расчете моделей атмосфер учитываются не-ЛТР эффекты и бленкетирование линий (например, [7]) и наличие звездного ветра. При вычислении модели атмосферы все необходимые элементы (водород, гелий и легкие металлы) представляются атомными моделями, и каждая линия рассчитывается отдельно.

Синтетический спектр для определенной модели атмосферы можно рассчитывать с помощью различных программных кодов, например, с помощью программного кода Synspec48 [7]. Свертку синтетических спектров с инструментальным профилем и профилем вращения можно осуществлять с помощью программы rotin [7].

Оценка параметров межзвездной среды

Оценки параметров распределения межзвездного газа на относительно малых масштабах возможно производить на основе мониторинга изменений в профилях межзвездных атомарных и молекулярных спектральных линий поглощения с оптических спектрах звезд-беглецов (см., например, [8]). Подобный мониторинг выполняется в оптическом диапазоне с использованием инструментов с высоким спектральным разрешением.

При проведении оценок параметров межзвездной среды на основе данных спектроскопического мониторинга важна однородность в анализе профилей исследуемых линий. Однородность анализа профилей межзвездных линий возможно реализовать с помощью автоматической процедуры построения уровня непрерывного спектра.

Автоматическая процедура построения непрерывного спектра основывается на полиномиальном приближении точек шумовой дорожки в окрестностях исследуемой линии. Степень полинома следует варьировать от 1 до 3 в зависимости от сложности профиля линии и количества точек в выбранных областях шумовой дорожки.

После проведения уровня непрерывного спектра следует оценить эквивалентную ширину межзвездных линий, на основе которой можно сделать оценку лучевой концентрации молекул, линии которой исследуются. В случае относительно малой оптической толщины для оценки лучевой

концентрации возможно использовать процедуру, встроенную в программный пакет Dech [9].

При наблюдении различных молекул по отношению их лучевых концентраций следует провести оценку температуры газа в той области, где образуется излучение молекул. В частности, для подобных оценок следует использовать отношение лучевых концентраций молекул CN и CN^+ . Скорость образования этих молекул различна при различных температурах и плотностях газа.

При анализе вариаций параметров профилей межзвездных линий со временем важны одновременные наблюдения межзвездных линий в спектрах звезд, которые не являются убегающими. В спектрах таких звезд вариации параметров профилей межзвездных линий маловероятны на относительно небольших промежутках времени. Анализ профилей межзвездных линий в спектрах таких звезд с помощью автоматической процедуры построения непрерывного спектра и сравнение с профилями межзвездных линий в спектрах убегающих звезд позволяет выявить инструментальные ошибки.

Список использованных источников литературы

1. Herrero A., Kudritzki R. P., Vilchez J. M., Kunze D., Bulter K., Haser S. Intrinsic parameters of galactic luminous OB stars. // *Astron. Astrophys.* – 1992. – V. 261 – P. 209–234.
2. Penny L. R. Projected rotational velocities of O-type stars. // *The Astrophysical Journal.* – 1996. – V. 463 – P. 737.
3. Simon-Diaz S., Herrero A. Fourier method of determining the rotational velocities in OB stars. // *Astron. Astrophys.* – 2007. – Vol. 468. – P. 1063–1073.
4. Martins F., Schaerer D., Hillier D. J. A new calibration of stellar parameters of Galactic O stars. // *Astronomy & Astrophysics.* – 2005. – V. 436 – P. 1049–1065.
5. Lanz T., Hubeny I. A grid of non-LTE line-blanketed model atmospheres of O-type stars. // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* – 2003. – Vol. 146. – P. 417–441.
6. Herrero A., Kudritzki R. P., Vilchez J. M., Kunze D., Bulter K., Haser S. Intrinsic parameters of galactic luminous OB stars. // *Astron. Astrophys.* – 1992. – V. 261 – P. 209–234.
7. Lanz T., Hubeny I. A grid of non-LTE line-blanketed model atmospheres of O-type stars. // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* – 2003. – Vol. 146. – P. 417–441.
8. P. Boissé, E. Rollinde, P. Hily-Blant, J. Pety et al. CO emission and variable CH and CH⁺ absorption towards HD 34078: evidence for a nascent bow shock? // *A&A* – 2009 – V.501, P.221-237.
9. Галазутдинов Г. А. DECH 2.0 // Препринт САО. – 1992. – №92.