

Линии железа как индикаторы светимости для F-, G-, K-сверхгигантов

Ф.А. Чехонадских

Одесский национальный университет им. И.И.Мечникова

Получено более 80 высокоточных соотношения между M_v , T_{eff} и отношением глубин спектральных линий железа. Эти соотношения были использованы для вычисления абсолютных звездных величин M_v для 43 F-, G-, K-сверхгигантов с точностью $0.05^m - 0.25^m$. На основании этих соотношений разработан программный код, который позволяет находить абсолютные звездные величины для сверхгигантов и классических цефеид спектральных классов F0–K0 и классов светимости I и II.

ЛІНІЇ ЗАЛІЗА ЯК ІНДИКАТОРИ СВІТНОСТЕЙ ДЛЯ F-, G-, K-НАДГІГАНТІВ, Чехонадських Ф.А. — Отримано понад 80 високоточних співвідношень між M_v , T_{eff} та відношенням глибин спектральних ліній заліза. Ці співвідношення були використані для визначення абсолютних зоряних величин M_v для 43 F-, G-, K-надгігантів з точністю $0.05^m - 0.25^m$. На підставі цих співвідношень був розроблений програмний код, який дозволяє отримувати абсолютні зіркові величини для надгігантів і класичних цефеїд спектральних класів F0–K0 та класів світностей I та II.

LINES OF IRON AS LUMINOSITY INDICATORS FOR F-, G-, K-SUPERGIANTS, Chekhonadskikh F.A. — We have achieved more than 80 high-precision relations between M_v , T_{eff} and iron line-depths ratios. These relations have been used for the estimation of the absolute magnitudes M_v for 43 FGK supergiants with an error $0.05^m - 0.25^m$. The program code based on our relations allows determining absolute magnitudes for supergiants and classical Cepheids of F0–G0 spectral classes and I–II luminosity classes.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхгиганты — звезды высокой светимости, поэтому их можно наблюдать на достаточно больших расстояниях. Однако, будучи достаточно немногочисленными объектами, большинство сверхгигантов к тому же расположены в плоскости диска Галактики, что приводит к их достаточно сильному покраснению. Это затрудняет изучение этих очень интересных звезд, особенно, когда задачи касаются определения светимостей и расстояний до них. Зависимость «период–светимость» для цефеид продолжает быть основным инструментом определения расстояний в Галактике и в местной группе галактик. Точность этой зависимости зависит от точности определения расстояний до калибровочных цефеид, а также от правильности учета межзвездного поглощения и покраснения для них. Для непременных сверхгигантов, по понятным причинам, эту зависимость применить нельзя. Поэтому необходимы другие способы определения абсолютных звездных величин сверхгигантов. В этой работе предлагается использовать набор спектроскопических индикаторов, чувствительных к светимости.

Калибровки абсолютных звездных величин для звезд спектральных классов A0–G2 для линий триплета кислорода OI 7774Å (по данным узкополосной фотометрии и низкодисперсионной спектроскопии), были предложены Ареллано Ферро [5]. Эти калибровки позволяют определять абсолютные звездные величины с точностью порядка 0.6^m , после уточнения этот метод позволил достичь точности $0.42^m - 0.43^m$ для цефеид и $0.38^m - 1.5^m$ — для непременных сверхгигантов [6]. Но, кроме невысокой точности, недостатком метода является сложность измерения суммарной эквивалентной ширины линии OI 7774Å, состоящей из трех компонент, а также сильная зависимость интенсивности триплета кислорода от температуры.

Предлагались калибровки светимости и при помощи фотометрических показателей цвета. Ареллано Ферро и Паррайо [4] предложили калибровки абсолютных звездных величин в фотометрической системе Стрёмгрена $uvby\beta$ для F–G сверхгигантов, используя как стандарты яркие непременные желтые сверхгиганты, для которых были известны с высокой точностью абсолютные звездные величины и покраснения. Похожие и независимые калибровки были предложены Греем [9].

Андриевский [2, 3] предложил использовать линии ионизованного бария Ba II для нахождения абсолютных звездных величин для непременных сверхгигантов и малоамплитудных цефеид.

Кроме линий OI 7774Å и Ba II и другие линии в спектрах сверхгигантов показывают чувствительность к светимости. Линии ионов всех элементов ведут себя подобно линиям Ba II, а интенсивность линий серы S I увеличивается для сверхгигантов с увеличением светимости (при постоянной T_{eff}).

Особого внимания заслуживает отношение глубин линий ионизованного и нейтрального железа, Fe II и Fe I, которое предлагается нами как новый возможный индикатор светимости. Отношение Fe II / Fe I зависит, в основном, от глубины линий Fe II, так как линии Fe I значительно слабее зависят от светимости. С повышением светимости линии Fe II усиливаются, что приводит к росту отношения Fe II / Fe I. Корреляция между отношением Fe II / Fe I и светимостью является результатом уменьшения плотности атмосфер сверхгигантов с ростом светимости, что приводит к усилению линий ионов (из-за уменьшения случаев рекомбинации ионов железа), а также действием не-ЛТР эффектов.

Целью данной статьи является определение M_v для F-, G-, и K- сверхгигантов и классических цефеид при помощи нового подхода: использования линий железа в качестве спектроскопических индикаторов светимости.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Спектры сверхгигантов были получены на 1.93-м телескопе обсерватории Верхнего Прованса (ОВП, Франция), оснащенном эшелле-спектрографом ELODIE [8], использован также электронный архив спектров ОВП [14]. Разрешающая способность спектрографа $R = 42000$, участок длин волн $\lambda\lambda = 440 - 680$ нм, отношение сигнал/шум 100 – 300. Первичная обработка спектров была проведена Катцем и др. [10].

Также были использованы спектры, полученные на спектрографе UVES, установленном на 8-м телескопе VLT Unit2 (Чили) [7]. Разрешающая способность спектрографа $R = 80000$, участок длин волн $\lambda\lambda = 300 - 1000$ нм, отношение сигнал/шум 300 – 500 в фильтре V.

Для классических цефеид были использованы ранее полученные данные [12]. Мы использовали только спектры, полученные в фазе максимального радиуса (радиальная скорость $V_{\text{rad}} = 0$ км/с), так как во всех остальных фазах данные отягощены динамическими и термодинамическими составляющими (например, возможно влияние ударных волн). Выбранная же фаза свободна от этих эффектов, поэтому возможно исследование зависимости M_v цефеид и спектроскопических индикаторов.

Дальнейшая обработка спектров (проведение континуума, отождествление, измерение глубин линий) проводилась при помощи программного пакета DECH20 [1].

3. ВЫЧИСЛЕНИЯ

Следующим этапом работы был отбор сверхгигантов, для которых были известны с высокой точностью абсолютные звездные величины. Это был очень важный и ответственный этап, так как погрешность конечной шкалы светимостей напрямую зависела от точности первичных данных (абсолютных величин и температур). Для 18 сверхгигантов из нашего списка (табл. 1) были использованы значения абсолютных звездных величин из работ следующих авторов: Аррелано Ферро и Паррайо [4], Аррелано Ферро и др. [5,6], Словик [15].

Значения эффективных температур T_{eff} определялись с использованием метода, изложенного в работе [11]. Этот метод основан на использовании отношений глубин избранных пар спектральных линий, наиболее чувствительных к температуре. Благодаря большому числу калибровок (131) этот метод обеспечивает внутреннюю точность определения T_{eff} порядка 10 – 30 К (ошибка среднего). Немаловажным достоинством этого метода, кроме высокой точности, является также возможность определения T_{eff} , свободных от влияния межзвездного покраснения.

Затем была проведена большая работа по поиску наиболее чувствительных к температуре пар линий из всех возможных комбинаций 1500 спектральных линий целого ряда химических элементов (атомов и ионов). Используя метод наименьших квадратов для поиска калибровок в виде полинома:

$$M_v = a + b \log T_{\text{eff}} + c \log^2 T_{\text{eff}} + d \left(\frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2}} \right) + e \left(\frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2}} \right)^2 + f \left(\frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2}} \right)^3$$

где a, b, c, d, e, f — некоторые коэффициенты, а также аппарат математической статистики, был найден ряд комбинаций линий с заметной чувствительностью к светимости. Первые результаты были представлены в работе [13]. Затем для всех калибровок был проведен дополнительный анализ, в результате которого были отобраны только калибровки, основанные на линиях железа. Во-первых, эти линии наиболее многочисленны у этого типа звезд, во-вторых, финальные калибровки получаются независимыми от влияния химического состава. Было найдено более 80 калибровок светимости от Fe II / Fe I, показавшие внутреннюю точность порядка $0.05^m - 0.25^m$. По этим соотношениям были вычислены абсолютные звездные величины для 43 сверхгигантов (табл. 1).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 представлены результаты новых расчетов абсолютных звездных величин для 18 непременных сверхгигантов и 25 классических цефеид. В первом столбце указаны названия объектов,

Таблица 1

Название	T_{eff}	M_v	$\sigma_{\text{ср.}}$	N	M_v (литература)	Методы
HD009973	6654	-7.42	0.08	5	-7.36	[6]
HD010494	6672	-7.38	—	1	-7.34	[6]
HD018391	5846	-7.73	0.22	18	-7.76	[4,6]
HD020123	5160	-1.74	0.06	28	-1.71	[6]
HD020902	6541	-4.41	0.12	11	-4.9	[4,5,6]
HD026630	5309	-3.11	0.02	37	-3.22	[6]
HD032655	6653	-0.71	—	1	-0.73	[6]
HD036673	6922	-6.35	0.07	8	-6.52	[6]
HD054605	6564	-7.9	0.05	21	-7.97	[5]
HD062345	4971	0.56	0.34	3	0.54	[6]
HD065228	5740	-2.39	0.06	49	-1.88	[6]
HD075276	6934	-6.87	0.58	4	-6.45	[6]
HD084441	5281	-1.23	0.08	13	-1.3	[6]
HD101947	6578	-7.89	0.09	6	-7.9	[4,6]
HD164136	6483	-2.33	0.12	22	-2.68	[6]
HD204867	5431	-3.35	0.04	47	-3.06	[6]
HD209750	5199	-3.48	0.04	39	-3	[6]
HD236433	6541	-4.09	0.06	32	-3.98	[15]
HD008890	6057	-3.1	0.02	53	-3.39	PL
HD017463	6165	-2.95	0.04	54	-2.47	PL
HD180583	6113	-1.95	0.05	51	-2.49	PL
HD162714	5561	-3.98	0.02	51	-4.71	PL
HD045412	5878	-3.03	0.03	62	-2.88	PL
HD031913	5677	-3.7	0.05	36	-4.24	PL
HD025361	5464	-3.75	0.02	50	-3.78	PL
HD188727	5406	-3.85	0.01	56	-3.85	PL
HD186688	5956	-2.81	0.06	32	-2.91	PL
HD044320	5204	-4.57	0.02	37	-4.57	PL
HD338867	5166	-5.34	0.06	22	-6.38	PL
HD187921	5000	-5.44	0.04	41	-5.87	PL
HD029260	5901	-3.19	0.03	37	-3.07	PL
HD044990	5020	-5.08	0.03	31	-5.26	PL
HD203156	6159	-3.14	0.07	39	-3.14	PL
HD014662	6067	-3.56	0.03	62	-4.12	PL
HD316354	5300	-3.96	0.05	40	-3.98	PL
HD236948	5279	-4.09	0.04	56	-4.17	PL
HD046595	5483	-3.62	0.02	47	-3.78	PL
HD164975	5540	-3.36	0.02	48	-3.73	PL
HD167660	5099	-4.92	0.03	38	-5	PL
HD197572	5022	-4.68	0.02	34	-4.66	PL
HD339279	5649	-3.5	0.02	48	-3.51	PL
HD089968	5733	-3.38	0.03	42	-3.4	PL
BD+221579	5201	-4.79	0.06	48	-4.08	PL

во втором и третьем столбцах представлены вычисленные эффективные температуры в кельвинах и абсолютные звездные величины, в четвертом столбце — погрешности вычислений звездных величин, в пятом — количество использованных соотношений, в шестом — данные из литературы или данные, полученные альтернативными методами, в седьмом указаны ссылки на описанные методы из списка литературы, а также (PL) — указатель на то, что звездные величины получены при помощи зависимости «период–светимость» для цефеид. Как мы можем видеть, погрешности полученных данных сопоставимы с ошибками исходных данных, что говорит об адекватности полученной методики. Абсолютная погрешность представленного метода составляет порядка $0.1^m - 0.2^m$ звездной величины и это позволяет сделать вывод о том, что метод достаточно точен и имеет прекрасную перспективу для дальнейшего развития. В заключение, автор хотел бы выразить благодарность д.ф.-м.н. В.В.Ковтюху за предоставленный наблюдательный материал и полезные дискуссии.

1. Галазутдинов Г.А. Система обработки звездных эшелле-спектров. — Нижний Архыз, 1992. — 52 с. — (Препринт / Российская АН. Спец. астрофиз. обсерв.; № 92)

2. *Andrievsky S.M.* BA II lines as luminosity indicators: s-Cepheids and non-variable supergiants // *Astron. Nachrichten* — 1998. — **319**, № 4. — P. 239–244.
3. *Andrievsky S.M.* Ba II line as Cepheid luminosity indicator // *Inform. Bulletin on Var. Stars* — 1998. — **4572**. — P. 1.
4. *Arellano Ferro A., Parrao L.* Colour excesses and absolute magnitudes for non-Cepheid F-G supergiants from $uvby\beta$ photometry // *Astron. Astrophys.* — 1990. — **239**, № 1–2. — P. 205–213.
5. *Arellano Ferro A., Mendoza V., Eugenio E.* Calibrations of M_v , (Fe/H) and $\log G$ for yellow supergiant stars from OI 7774 and $uvby\beta$ data // *Astron. J.* — 1993. — **106**, № 6. — P. 2516–2523.
6. *Arellano Ferro A., Giridhar S., Rojo Arellano E.* A revised calibration of the M_{V-W} (O I 7774) relationship using Hipparcos data: its application to Cepheids and evolved stars // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica.* — 2003. — **39**. — P. 3–15.
7. *Bagnulo S., Jehin E., Ledoux C., et al.* The UVES Paranal observatory project: A library of high-resolution spectra of stars across the Hertzsprung–Russell diagram // *ESO Messenger*. — 2003. — **114**. — P. 10–14.
8. *Baranne A., Queloz D., Mayor M., et al.* ELODIE: A spectrograph for accurate radial velocity measurements // *Astron. Astrophys. Suppl.* — 1996. — **119**. — P. 373–390.
9. *Gray R.O.* The calibration of Stromgren photometry for A, F and early G supergiants // *Astron. Astrophys.* — 1991. — **252**. — P. 237–244.
10. *Katz D., Soubiran C., Cayrel R., et al.* On-line determination of stellar atmospheric parameters T_{eff} , $\log g$, [Fe/H] from ELODIE echelle spectra // *Astron. Astrophys.* — 1998. — **338**. — P. 151–160.
11. *Kovtyukh V.V.* High-precision effective temperatures of 161 FGK supergiants from line-depth ratios // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 2007. — **378**, № 2. — P. 617–624.
12. *Kovtyukh V. V., Soubiran C., Luck R.E., et al.* Reddenings of FGK supergiants and classical Cepheids from spectroscopic data // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 2008. — **389**, № 3. — P. 1336–1344.
13. *Kovtyukh V.V., Chekhonadskikh F.A.* Spectral luminosity indicators for FGK supergiants and classical Cepheids // *Odessa Astron. Publ.* — 2008. — **21**. — P. 48–52.
14. *Moultaka J., Ilovaisky S.A., Prugniel P., Soubiran C.* The ELODIE Archive // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* — 2004. — **116**, № 821. — P. 693–698.
15. *Slowik D.J., Peterson D.M.* Absolute magnitudes and colors of A–F supergiants from near-infrared features // *Astron. J.* — 1995. — **109**. — P. 2193–2203.

Поступила в редакцию 25.07.2009