НОВЫЕ ИНДИКАТОРЫ СВЕТИМОСТИ ДЛЯ F-, G-, K-СВЕРХГИГАНТОВ

Ф. А. Чехонадских, В. В. Ковтюх

Астрономическая обсерватория Одесского национального университета имени И. И. Мечникова
65014 Одесса, парк имени Т. Г. Шевченко
e-mail: val@deneb1.odessa.ua, chehonadskih@gmail.com

Получено более 80 высокоточных соотношений между M_v, $T_{эф}$ и отношением глубин спектральных линий железа. Эти соотношения были использованы для вычислений абсолютных звездных величин M_v для 42 F-, G-, K-сверхгигантов с точностью 0.05–0.25^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.

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 непеременных 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 O I $\lambda\,7774$ Å (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 0.42–0.43^m для цефеид и 0.38–1.5^m для непеременных сверхгигантов [6]. Но, кроме невысокой точности, недостатком метода является сложность измерения суммарной эквивалентной ширины линии O I 7774 Å, 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 непеременные 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 непеременных сверхгигантов и малоамплитудных цефеид. Кроме линий O I $\lambda\,7774$ Å 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 $T_{эф}$). 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 неЛТР-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.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ВЫЧИСЛЕНИЯ

Спектры сверхгигантов были получены на 1.93-м телескопе обсерватории Верхнего Прованса (ОВП, Франция), оснащенном эшеле-спектрографом ELODIE [8], использован также электронный архив спектров ОВП [13]. Разрешающая способность спектрографа $R = 42\,000$, участок длин волн $\lambda\lambda = 440$–680 нм, отношение сигнал/шум 100–300. Также были использованы спектры, полученные на спектрографе UVES, установленном на 8-м телескопе VLT Unit2 (Чили) [7]. Разрешающая способность спектрографа $R = 80\,000$, участок длин волн $\lambda\lambda = 300$–1000 нм, отношение сигнал/шум 300–500 в фильтре V. Для классических цефеид были использованы ранее полученные данные [11]. Мы использовали только спектры, полученные в фазе максимального радиуса (радиальная скорость $V_{rad} = 0$ 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]. 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 [14]. Значения эффективных температур $T_{эф}$ определялись с использованием метода, изложенного в работе [10]. 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 $T_{эф}$ порядка 10–30 K (ошибка среднего). Немаловажным достоинством этого метода, кроме высокой точности, является также возможность определения $T_{эф}$, 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). Первые результаты были представлены в работе [12]. 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. Были найдены более 80 калибровок светимости от Fe II / Fe I, показавших внутреннюю точность порядка 0.05–0.25^m. По этим соотношениям были вычислены абсолютные звездные величины для 42 сверхгигантов (табл. 1).

Таблица 1. Новые данные для 18 непеременных сверхгигантов и 24 классических цефеид

HD/BD	$T_{эф}$ (K)	M_v	σ	N	M_v (лит.)	HD/BD	$T_{эф}$ (K)	M_v	σ	N	M_v (лит.)
008890	6057	−3.10	0.02	53	−3.39	075276	6934	−6.87	0.58	4	−6.45
009973	6654	−7.42	0.08	5	−7.36	084441	5281	−1.23	0.08	13	−1.30
010494	6672	−7.38	–	1	−7.34	089968	5733	−3.38	0.03	42	−3.40
014662	6067	−3.56	0.03	62	−4.12	101947	6578	−7.89	0.09	6	−7.90
017463	6165	−2.95	0.04	54	−2.47	162714	5561	−3.98	0.02	51	−4.71
018391	5846	−7.73	0.22	18	−7.76	164136	6483	−2.33	0.12	22	−2.68
020123	5160	−1.74	0.06	28	−1.71	164975	5540	−3.36	0.02	48	−3.73
020902	6541	−4.41	0.12	11	−4.90	167660	5099	−4.92	0.03	38	−5.00
025361	5464	−3.75	0.02	50	−3.78	180583	6113	−1.95	0.05	51	−2.49
026630	5309	−3.11	0.02	37	−3.22	186688	5956	−2.81	0.06	32	−2.91
029260	5901	−3.19	0.03	37	−3.07	187921	5000	−5.44	0.04	41	−5.87
031913	5677	−3.70	0.05	36	−4.24	188727	5406	−3.85	0.01	56	−3.85
032655	6653	−0.71	–	1	−0.73	197572	5022	−4.68	0.02	34	−4.66
036673	6922	−6.35	0.07	8	−6.52	203156	6159	−3.14	0.07	39	−3.14
044320	5204	−4.57	0.02	37	−4.57	204867	5431	−3.35	0.04	47	−3.06
044990	5020	−5.08	0.03	31	−5.26	209750	5199	−3.48	0.04	39	−3.00
045412	5878	−3.03	0.03	62	−2.88	221579	5201	−4.79	0.06	48	−4.08
046595	5483	−3.62	0.02	47	−3.78	236433	6541	−4.09	0.06	32	−3.98
054605	6564	−7.90	0.05	21	−7.97	236948	5279	−4.09	0.04	56	−4.17
062345	4971	+0.56	0.34	3	+0.54	316354	5300	−3.96	0.05	40	−3.98
065228	5740	−2.39	0.06	49	−1.88	339279	5649	−3.50	0.02	48	−3.51

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 представлены результаты новых расчетов абсолютных звездных величин для 18 непеременных сверхгигантов и 24 классических цефеид. В первом столбце указаны названия объектов, 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. Как мы можем видеть, погрешности полученных данных сопоставимы с ошибками исходных данных, что говорит об адекватности полученной методики. Абсолютная погрешность представленного метода составляет порядка $0.1–0.3^m$ звездной величины и это позволяет сделать вывод о том, что метод достаточно точен и имеет прекрасную перспективу для дальнейшего развития.

[1] *Галазутдинов Г. А.* Система обработки звездных эшелле-спектров. – Нижний Архыз : Препринт / Российская АН. Спец. астрофиз. обсерв. – 1992. – № 92. – 52 с.

[2] *Andrievsky S. M.* Ba II lines as luminosity indicators: s-Cepheids and non-variable supergiants // Astron. Nachr. – 1998. – **319**, N 4. – P. 239–244.

[3] *Andrievsky S. M.* Ba II lines as luminosity indicators // 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. and Astrophys. – 1990. – **239**, N 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 O I 7774 and $uvby\beta$ data // Astron. J. – 1993. – **106**, N 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 Astronomía y Astrofisíca – 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. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1996. – **119**. – P. 373–390.

[9] *Gray R. O.* The calibration of Stromgren photometry for A, F and early G supergiants // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1996. – **119**. – P. 373–390.

[10] *Kovtyukh V. V.* High-precision effective temperatures of 161 FGK supergiants from line-depth ratios // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2007. – **378**, N 2. – P. 617–624.

[11] *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**, N 3. – P. 1336–1344.

[12] *Kovtyukh V. V., Chekhonadskikh F. A.* Spectral luminosity indicators for FGK supergiants and classical Cepheids // Odessa Astron. Publ. – 2008. – **21**. – P. 48–52.

[13] *Moultaka J., Ilovaisky S. A., Prugniel P., Soubiran C.* The ELODIE Archive // Publs Astron. Soc. Pacif. – 2004. – **116**, N 821. – P. 693–698.

[14] *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.