

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТМОСФЕРЕ γ Ar-ЗВЕЗДЫ HD134214. ЛИНИИ Nd II, Nd III, Gd II

Н.Г.МИХАЙЛИЦКАЯ

Поступила 19 июня 2015

Принята к печати 16 сентября 2015

По спектрам высокого разрешения исследовалось содержание редкоземельные элементы (REE) в атмосфере магнитной, быстро-осциллирующей, химически-пекулярной (γ Ar) звезды HD134214. Содержание неодима рассмотрено по линиям в первой и второй стадиях ионизации. В атмосфере γ Ar звезды наблюдается нарушение ионизационного равновесия REE (несогласие содержаний, определяемых по линиям однократно и двукратно ионизованных атомов). Наблюдается избыток содержаний редкоземельных элементов (относительно Солнца). Приведены результаты анализа содержаний REE и некоторых других элементов. По чувствительным линиям определены модуль магнитного поля и его составляющие B_p/B_m .

Ключевые слова: звезда HD134214; магнитное поле; профили спектральных линий; содержание химических элементов

1. *Введение.* Для звезды HD 134214 (H1 Lib) в 1985 и 1986гг. обнаружены быстрые осцилляции фотометрических кривых блеска с периодом 5.65 мин [1,2]. Впервые это явление выявлено Куртцом [3] в 1978г. для звезды Пшибельского (HD 101065). Быстрые осцилляции фотометрических кривых блеска оказались характерными для ряда звезд, которые образуют группу γ Ar-звезд (rapid oscillating stars). HD 134214 принадлежит к магнитным, быстро-осциллирующим, химически-пекулярным звездам [4,5]. Для γ Ar-звезд амплитуда осцилляций блеска, как и интенсивность магнитного поля, в некоторых случаях может модулироваться вращением звезды. В 1982г. Куртц [6] предложил модель наклоненного пульсатора, в котором направление оси пульсаций совпадает с направлением оси магнитного поля, под некоторым углом к оси вращения. Магнитные поля этих звезд в первом приближении имеют дипольную структуру. Группу γ Ar составляют около 40 звезд.

Атмосферам γ Ar-звезд характерны аномалии химического состава. Наблюдается избыток содержания редкоземельных элементов (REE), относительно Солнца. При этом имеет место нарушение ионизационного равновесия: содержания определяемые по линиям вторых ионов REE, на 1.0-1.7 порядка превосходят содержания по линиям первых ионов [7].

Линии REE исследовались в работах [8-10]. Для звезды HD 134214 в работах [8,9] исследовались REE, а также содержание лития и его изотопное отношение (с учетом блендирующих линий REE). По трем спектральным линиям Ca I 610.27 нм, Fe II 614.9 нм, Pr III 670.67 нм определены модуль магнитного поля и его составляющие компоненты B_r/B_m и по двум линиям Fe II 614.9 нм, Pr III 670.67 нм - параметр $v \sin i$. В работе [10] определено содержание неодима по линии во второй стадии ионизации, а также модуль магнитного поля и параметр $v \sin i$ по спектральным линиям Ca I 616.217 нм, Nd III 669.083 нм. Содержание кальция и железа исследовалось в работах [8,10]. В работе Рябчиковой [11] приведены результаты анализа изотопов Ca, определено поверхностное магнитное поле и компоненты магнитного поля, а также параметр $v \sin i$, T_{eff} , $\log g$.

Цель данной работы: исследовать аномалии содержаний редкоземельных элементов в первой и второй стадии ионизации, с учетом влияния магнитного поля на формирование профилей спектральных линий в атмосфере магнитной α Ap-звезды HD 134214.

2. *Наблюдения.* В работе использованы спектры звезды HD 134214 с высоким разрешением. Спектр звезды HD 134214 получены в 1996г. на 1.4-м телескопе CAT Куде спектрометре CES в обсерватории La Silla. Детектор - матрица ESO CCD N34 2048 2048 (размер пиксела 15мкм x 15мкм, что обеспечило разрешение $R=100000$). Данные наблюдений HD 134214 приведены в табл.1.

Таблица 1

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ HD 134214

Дата	Экспозиция, мин	Область, Å	Телескоп
13/03/96	60	612.0-618.0	ESO/CAT, $R=100000$
11/03/96	60	667.5-673.5	ESO/CAT, $R=100000$
12/03/96	60	667.5-673.5	ESO/CAT, $R=100000$

3. *Синтетические спектры.* HD 134214 принадлежит к магнитным пекулярным звездам, которые имеют повышенную плотность линий, уширенных магнитным полем. Поэтому такие спектры сложны и имеют много блендированных линий. На формирование профилей спектральных линий влияет значение модуля магнитного поля (B) и его компоненты (B_r/B_m). Поэтому для некоторых спектральных линий магнитное поле и его компоненты определялись отдельно.

Период вращения звезды HD 134214 четко не установлен, возможно, звезда очень медленно вращается или видна со стороны полюса [9]. Так-как уширение спектральных линий вследствие вращения и уширение

спектральных линий вследствие быстрых осцилляций, являются результатом доплеровских смещений, то оба эффекта не всегда отличимы и модулируются вращательным профилем с параметром $v \sin i$. При расчетах учтено дополнительное уширение, которое описано параметром $v \sin i = 2.5$ км/с, определенное в предыдущей работе [10].

Для расчетов выбрана эффективная температура атмосферы, что наиболее часто встречается в работах. Эффективная температура звезды найдена в 2000г. - $\log T_{\text{eff}} = 3.849 \pm 0.018$ в работе [12], в 2006г. - $\log T_{\text{eff}} = 3.858 \pm 0.012$ [13] и в 2008г. - $T_{\text{eff}} = 7315$ ($\log T_{\text{eff}} = 3.864$) [11], в 2012г. - $\log T_{\text{eff}} = 3.858$ [5]. Расчеты проведены с моделью атмосферы Куртуа [14] с параметрами $T_{\text{eff}} = 7250$ K, $\log g = 4.45$, $\xi_t = 1$ км/с.

4. *Параметры атомных линий.* В работе использован список линий из базы данных спектральных линий атомов VALD [15]. Поскольку звезда HD 134214 имеет избыток содержания редкоземельных элементов, то список линий VALD был дополнен линиями REE из базы данных DREAM [16]. Уточненные значения линий Nd III 6145.0677 Å, Nd III 6690.8302 Å взяты из работы [17].

Данные базы DREAM дополнены квантовыми числами, термами, факторами Ланде из списка данных NIST для соответствующих уровней энергии, которые необходимы для расчетов синтетического спектра в магнитном поле [18]. Если факторы Ланде (g) в данных NIST отсутствовали, то они рассчитывались по формуле

$$g = 1 + [J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)] / J(J+1),$$

где J , S , L - квантовые числа [19].

5. *Магнитное поле звезды.* В программе расчета синтетического спектра С.А.Хана SYNTHM упрощенная модель магнитного поля характеризуется радиальной B_r , меридиональной B_m (долготная $B_\phi = 0$) составляющими поля [20].

В силу сложного эффекта Зеемана, абсолютная величина расщепления определяется модулем напряженности магнитного поля B и фактором Ланде g :

$$\Delta\lambda = (M_{j1}g_1 - M_{j2}g_2)eB\lambda^2 / (4\pi mc^2),$$

где B - напряженность магнитного поля $\{|B| = (B_r^2 + B_m^2 + B_\phi^2)^{1/2}\}$, g_1 , g_2 и M_{j1} , M_{j2} - соответственно факторы Ланде и магнитные квантовые числа для верхнего и нижнего уровней, а $M_j = -J, \dots, +J$... Если $\Delta M_j = 0$, то образуются π -компоненты, если $\Delta M_j = \pm 1$ то - две группы σ -компонентов.

При наблюдениях вдоль линий магнитного поля π -компоненты отсут-

ствуют, а при наблюдениях поперек магнитного поля сумма интенсивностей всех π -компонент равна сумме интенсивностей всех σ -компонент [19].

Процесс формирования спектральных линий в звездных атмосферах зависит от величины модуля магнитного поля и его компонентов. Модуль напряженности магнитного поля определен по линиям Fe I 6136.615 Å, Fe I 6137.691 Å. Они чувствительны к модулю напряженности магнитного поля $|B|$, но мало чувствительны к компонентам (B_r/B_m) рис.2. Модуль напряженности магнитного поля $|B|$ и компоненты магнитного поля (B_r/B_m) определены по линиям Ca I 6717.681 Å, Fe I 6677.924 Å рис.1, 4. На рис.1a показано чувствительность линии к модулю напряженности магнитного поля $|B|$, на рис.1b - чувствительность линий к составляющим магнитного поля (B_r/B_m) . Соответствующие данные приведены в табл.2. Полученные значения параметров магнитного поля согласуются с данными работ [10,11,8,9].

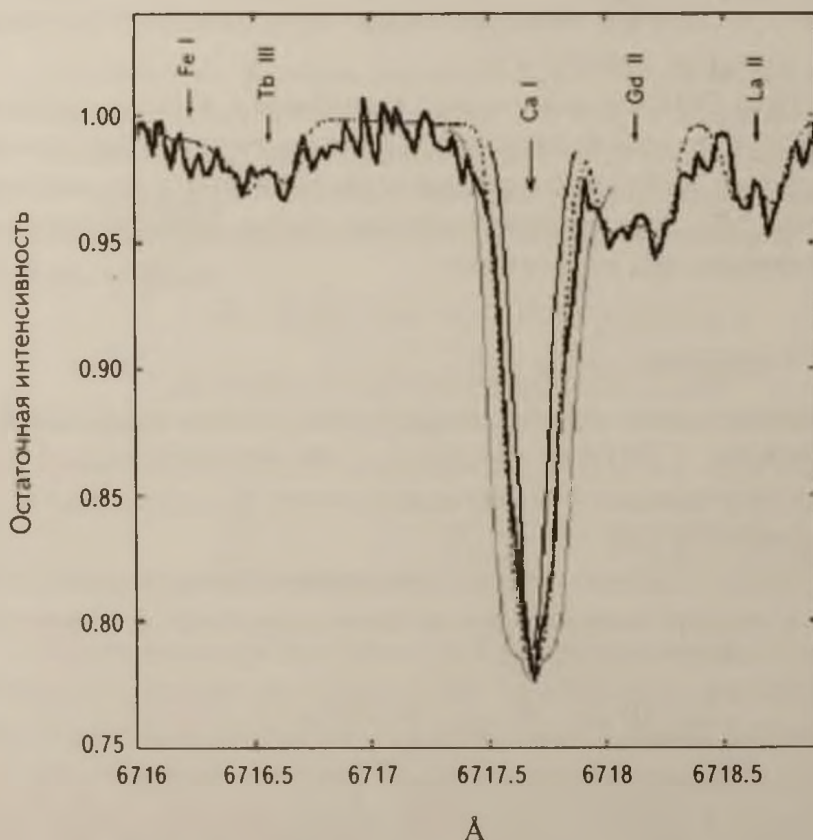


Рис.1a. Наблюдаемый (сплошная жирная линия) и синтетические профили линии Ca I 6717.681 Å ($v \sin i = 2.5$ км/с) с разной чувствительностью к модулю напряженности магнитного поля $|B|$: сплошная тонкая линия - $|B| = 1800$ Гс; пунктирная линия - $|B| = 3800$ Гс; сплошная серая линия - $|B| = 5800$ Гс.

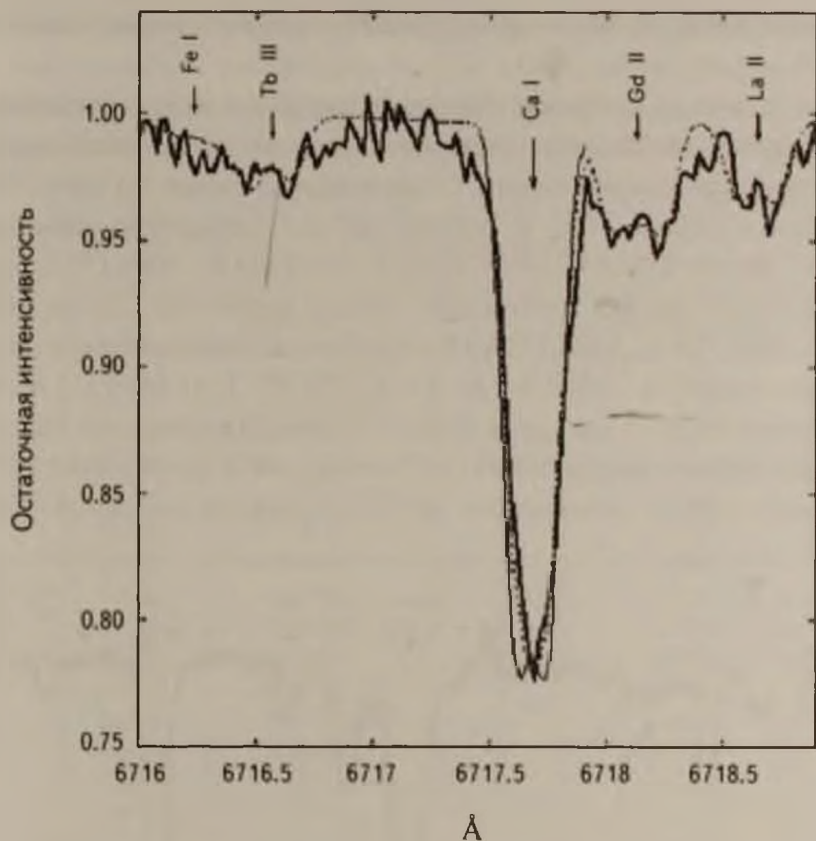


Рис. 1b. Наблюдаемый (сплошная жирная линия) и синтетические профили линии Ca I 6717.681 Å ($v \sin i = 2.5$ км/с) с разной чувствительностью к компонентам магнитного поля B_r/B_m : пунктирная линия - $B_r = 2700$ Гс, $B_m = 2700$ Гс; сплошная тонкая линия - $B_r = 3800$ Гс, $B_m = 0$.

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЙ МОДУЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИХ

Элемент λ , Å	$ B $ Гс	B_r/B_m , Гс
Fe I 6136.615	3700	--
Fe I 6137.692	3700	--
Fe I 6677.924	3534	1500/3200
Ca I 6717.681	3800	2700/2700

6. *Полученные результаты.* Для γ Ar-звезд точность определения химического состава, в первую очередь, зависит от полноты учета всех линий, входящих в бленды.

Исследование редкоземельных элементов проводится впервые, многие линии блендированы, поэтому, вначале определялось содержание часто встречающихся элементов Si, Ca, Fe (табл.3). При расчетах также учтены

слабые линии, которые блендируют представляющие интерес основные линии.

Для исследования выбраны участки спектра с сильными линиями REE. Содержание неодима рассмотрено отдельно по линиям ионов в первой и второй стадиях ионизации. Содержание по линии Nd 6690.8302 Å определялось в работе [10], в данной работе определено по линии 6141.0677 Å. Линии 6166.642 Å, 6170.450 Å, 6678.524 Å, 6680.137 Å были использованы для оценки содержания первых ионов Nd. Линии Nd II (6170.450 Å, 6678.524 Å, 6680.137 Å) блендированы соответственно очень близкими линиями Fe I 6170.507 Å, Ca I 6678.505 Å Ti II 6680.133 Å, что усложняет определение содержания каждого из близких элементов. Поэтому для блендированных линий Nd II (6170.450 Å, 6678.524 Å, 6680.137 Å) было найдено равное содержание -8.70 dex. Каждая из линий Nd II

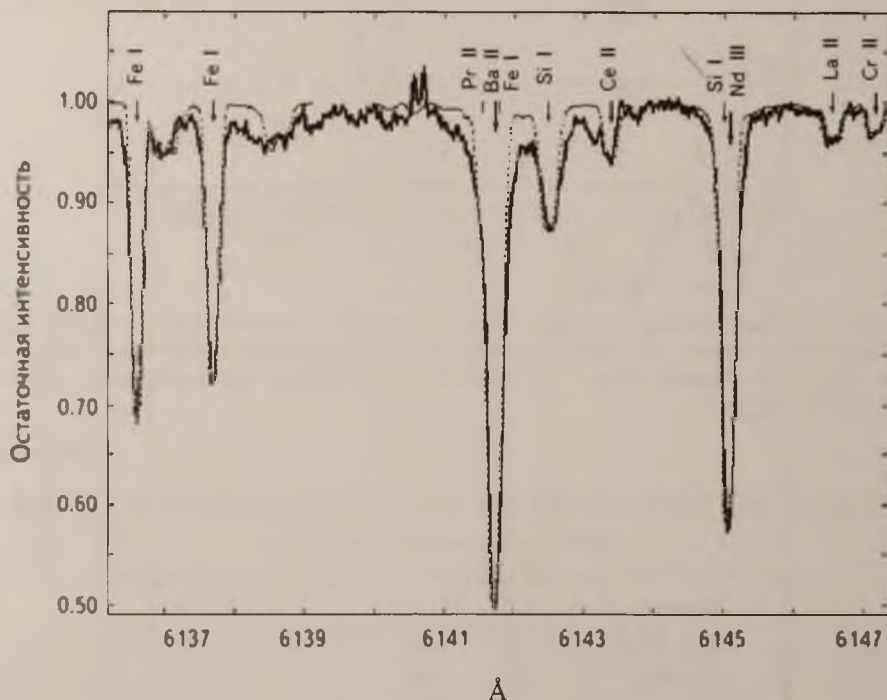


Рис.2. Сплошная жирная линия - наблюдаемый спектр, штриховая линия - рассчитанный спектр.

6680.137 Å и Ti II 6680.133 Å может описать наблюдаемый профиль, поэтому со значением содержание -8.70 dex (Nd II) титан будет иметь содержание -6.86dex.

Для блендированных спектральных линий со сложными профилями показаны отдельно рассчитанные линии Nd II 6166.642 Å, Nd II 6170.480 Å, Fe I 6170.507 Å рис.3. Линия Gd II 6681.199 Å очень чувствительна к

магнитному полю и имеет сложный профиль. Под влиянием магнитного поля она частично расщеплена на три компонента. На рис.4 показаны рассчитанные в отдельности линии Gd II 6681.199 Å, Sm II 6681.530 Å. Наблюдаемый профиль линии Gd II 6681.199 Å блендированной Sm II

Таблица 3

СОДЕРЖАНИЯ

	$\log(N/N_{\text{tot}})$	n	Sun $\log(N/N_{\text{tot}})$
Si I	-4.44 ± 0.15	2	-4.53
Ca I	-5.72 ± 0.12	6	-5.73
Ti II	≈ -6.86	1	-7.14
Cr II	≈ -5.50	1	-6.40
Fe I	-4.75 ± 0.25	5	-4.59
Ba II	-9.71	1	-9.87
La II	≈ -8.40	2	-10.82
Ce II	≈ -8.50	1	-10.49
Pr II	≈ -9.90	1	-11.33
Pr III	≈ -8.10	1	-11.33
Nd II	-8.64 ± 0.12	4	-10.59
Nd III	-7.49 ± 0.29	2	-10.59
Sm II	≈ -9.04	3	-11.04
Gd II	-7.99 ± 0.10	3	-10.92

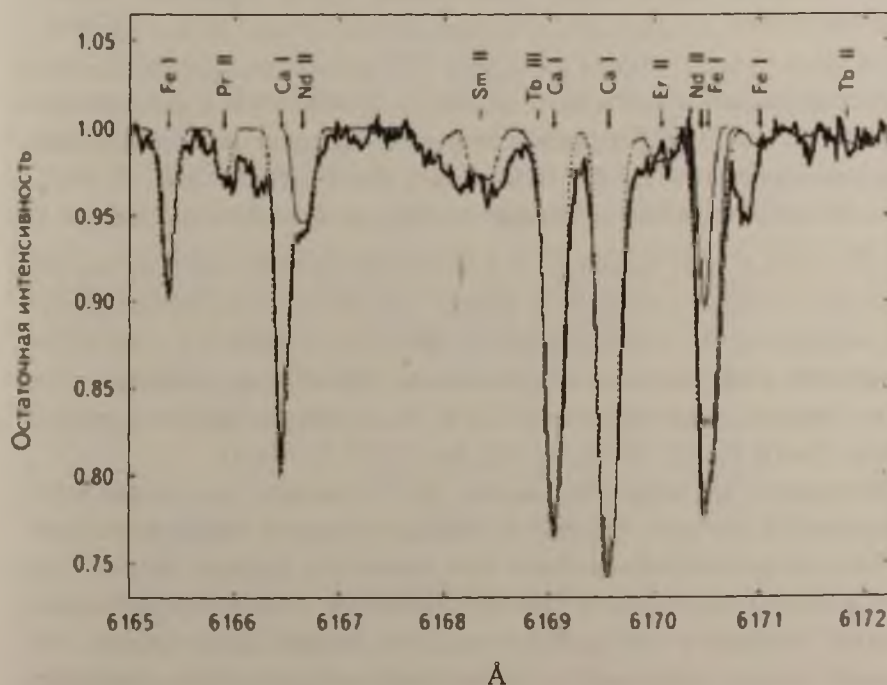


Рис.3. Сплошная жирная линия - наблюдаемый спектр, штриховая линия - рассчитанный спектр.

6681.530 Å хорошо описывается при значении магнитного поля $B_p = 1500$ Гс, $B_p = 3200$ Гс.

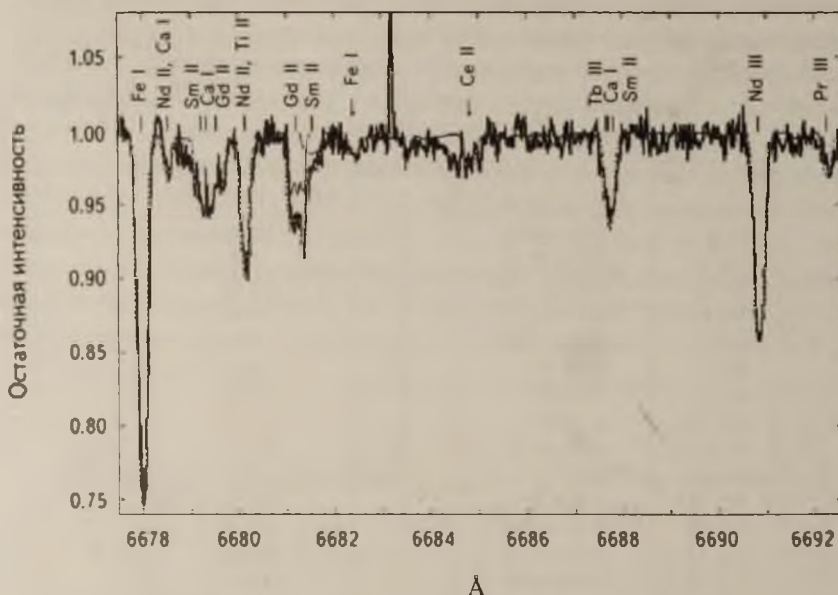


Рис.4. Сплошная жирная линия - наблюдаемый спектр, штриховая линия - рассчитанный спектр.

В работе также определено содержание элементов в первой стадии ионизации Ba II, Gd II. По слабым линиям были даны приблизительные содержания для La II, Ce II, Pr II, Pr III, Sm II, Ti II, Cr II. В табл.3 приведены окончательные значения содержаний и количество линий.

7. Основные результаты. В атмосфере быстро-осциллирующей, химически-пекулярной магнитной звезды HD134214 исследовались содержания редкоземельных элементов (REE). Впервые оценивается содержание Nd в первой и второй стадиях ионизации, определено содержание по линиям в первой стадии ионизации Gd II, Ba II, а также приблизительные значения La II, Ce II, Pr II, Pr III, Sm II, Ti II, Cr II.

Наблюдается избыток содержания REE относительно солнечного. Содержание Nd, которое получено по линиям во второй стадии ионизации, на 1.15 dex превосходит содержание этих элементов, которое получено по линиям в первой стадии ионизации. Этот результат невозможно объяснить никакими ошибками стандартного анализа химического состава, что показывает сильное отклонение от ионизационного равновесия в атмосфере γ Ар-звезды HD 134214. Аномалии состава REE, согласно литературе, свойственны звездам γ Ар

В работе также определено содержания Si I, Ca I, Fe I. По чувствительным спектральным линиям определено модуль магнитного поля и его составляющие компоненты B_r/B_m табл.2. Результаты согласуются с другими исследованиями [9,10].

Автор выражает глубокую благодарность администрациям баз атомных данных VALD, DREAM, NIST, доступных через интернет, Г.У.Ковальчуку за консультацию, а также С.А.Хану за программу синтетического спектра SynthM.

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины 03680, Киев, e-mail: Ninel--@ukr.net

A STUDY OF RARE EARTH ELEMENTS IN THE ATMOSPHERES OF roAp-STAR HD 134214. LINES Nd II, Nd III, Gd II

N.G.MYKHAILYTSKAYA

On the base of high-resolution spectra of the magnetic, rapidly oscillating, chemically peculiar star (roAp) HD 134214 we analyze the abundance of rare-earth elements (REE). The lines of Nd in the first and second stages of ionization were investigated. The ionization equilibrium in the roAp-star violates (so that abundances derived separately with lines of ions in the first and second stages of ionization differ). Abundance of REE is found to exceed that for the Sun. The results obtained for the abundance of REE and some other elements are given. The sensitive lines were used to determine the module of magnetic field and the ratio B_r/B_m of its components.

Key words: *star HD 134214: magnetic field: spectral lines: abundance of chemical elements*

ЛИТЕРАТУРА

1. T.J.Kreidl, Inf. Bull. Variable Stars, **1**, 2739, 1985.
2. T.J.Kreidl, D.W.Kurtz, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **220**, 313, 1986.
3. D.W.Kurtz, Inf. Bull. Var. Stars, **1**, 1978.

4. *P.Renson, J.Manfroid*, Astron. Astrophys., **498**, 961, 2009.
5. *H.Saio, M.Gruberbauer, W.W.Weiss et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **420**, 283, 2012.
6. *D.W.Kurtz*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **200**, 807, 1982.
7. *Т.А.Рябчикова, И.С.Саванов, В.П.Маланушенко, Д.О.Кудрявцев*, Астрон. ж., **78**, 444, 2001.
8. *A.V.Shavrina, N.S.Polosukhina, S.Khan et al.*, Proc. IAU Symp., **711**, 2004.
9. *А.В.Шаврина, Н.С.Полосухина, С.Хан и др.*, Астрон. ж., **83**, 560, 2006.
10. *Н.Г.Михайлицкая*, Кинематика и физика небесных тел., **26**, 41, 2010.
11. *T.Ryabchikova, O.Kochukhov, S.Bagnulo*, Astron. Astrophys., **480**, 811, 2008.
12. *S.Hubrig, P.North, G.Mathys*, Astrophys. J., **539**, 532, 2000.
13. *O.Kochukhov, S.Bagnulo et al.*, Astron. Astrophys., **450**, 763, 2006.
14. *R.L.Kurucz*, CDR, Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, (1-23), 1994
15. *F.Купка, N.Е.Рискун, Т.А.Рябчикова et al.*, VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 138, N 1.-P. 119-133, 1999.
16. *E.Biemont, P.Palmeri, P.Quinet*, D.R.A.M. Database on Rare Earth at Mons. Univ. <http://www.umons.ac.be/~astro/dream.shtml>).
17. *T.Ryabchikova, A.Ryabtsev, O.Kochukhov et al.*, Astron. Astrophys., **456**, 329, 2006.
18. *W.C.Martin, J.Reader, W L.Wiese*, NIST Compilations and databases for atomic spectra, (<http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData>), 2003.
19. *С.Г.Фриш*, Оптические спектры атомов, М., Физматгиз, 1963, с.640.
20. *С.А.Хан*, Кинематика и физика небесных тел., **19**, 534, 2003.