

УДК 523.94-36

Определение содержания кобальта в солнечной атмосфере с учетом влияния сверхтонкой структуры

Р. Е. Рикалюк

По согласованию теоретических и наблюдаемых эквивалентных ширин 37 линий поглощения Co I определено содержание кобальта в солнечной фотосфере: $4.89 \leq \lg A(\text{Co}) \leq 4.95$ (большее значение соответствует модели HOLMU, меньшее — модели VAL). Учет эффектов сверхтонкой структуры (СТС), как возможного уширяющего фактора для фраунгоферовых линий, выполнен в предположении, что СТС уширяет линии аналогично микротурбулентности. Пренебрежение влиянием СТС приводит к завышению значения содержания кобальта в среднем на 0.05 dex.

DETERMINATION OF COBALT ABUNDANCE IN THE SOLAR PHOTOSPHERE ACCOUNTING FOR THE EFFECT OF HYPERFINE STRUCTURE, by Rikalyuk R. E.— Calculations of 37 Co I absorption lines are performed. The cobalt abundance in the solar atmosphere is determined comparing theoretical and observed equivalent widths. Calculations of hfs effects, as a possible broadening factor for the Fraunhofer lines, are performed assuming that the hyperfine structure and microturbulence broaden these lines similarly. The most probable value of cobalt abundance determined from Co I absorption lines is found to be within $4.89 \leq \lg A(\text{Co}) \leq 4.95$.

Одной из причин, приводящих к уширению спектральных линий солнечной атмосферы, является сверхтонкая структура (СТС), характерная для элементов с ненулевым спином ядра, в частности для кобальта. Современная теория позволяет рассчитать величину расщепления энергетического уровня, число компонент СТС, а также их относительные интенсивности. Эти же результаты можно определить путем лабораторных исследований. Результирующий контур спектральной линии можно получить, учитывая вклад всех компонент. Таким методом выполнены расчеты содержаний кобальта [15] и марганца [17], а также определены значения сил осцилляторов 50 линий Co I [3]. Цель данного исследования — определить, в какой степени эффекты СТС влияют на величину содержания кобальта, определяемого по профилям фраунгоферовых линий, не прибегая к сложным вычислениям.

Почти все известные результаты определения содержания кобальта в солнечной атмосфере приведены в табл. 1, согласно которой наиболее вероятное значение содержания кобальта $\lg A(\text{Co}) = 4.9$.

Таблица 1. Содержание кобальта в фотосфере Солнца по данным разных исследований

Литературный источник	Содержание кобальта	Способ определения
[21]	5.6	Визуальные оценки
[11]	4.74	Кривая роста
[18]	4.41	»
[6]	4.70	»
[23]	3.53	Кривая роста для линий ионов
[15]	4.5	Линии нейтральных атомов с учетом СТС
[10]	4.50	Сводное значение
[20]	4.90	»
[1]	4.28	Центральные глубины
[12]	4.70	Сводное значение
[7]	4.98	Линии ионов по трем моделям
[8]	4.91—4.98	Линии нейтральных атомов по трем моделям
[19]	5.00	Сводное значение

Наблюдательный материал и методика определения содержания.
 Для исследования отобраны 37 фраунгоферовых линий Co I с известными центральными глубинами d , эквивалентными ширинами W и полуширинами $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$ [13]. Содержание кобальта определялось по трем системам сил осцилляторов: Куруца и Пейтремана [16], Кардона и др. [9], Э. А. Гуртовенко и др. [3]. Параметры фраунгоферовых линий приведены в табл. 2.

Таблица 2 Параметры фраунгоферовых линий Co I и содержание кобальта, определенное по ним для модели солнечной атмосферы VAL

λ , нм	EP , эВ	d , %	W , пм	$\lg gf$ [16]	$\lg gf$ [3]	$\Delta\lambda_{\text{СТС}}$, пм	$\lg A(\text{Co})(W)$	
							без учета СТС	с учетом СТС
451.71	3.11	36	3.3	-0.74	—	5.0	4.07	3.94
457.00	3.62	6	0.6	-3.37	-0.64	7.0	7.74	7.72
459.46	3.62	11	1.1	-0.02	—	6.0	4.68	4.64
459.69	3.62	15	1.6	0.06	—	7.0	4.79	4.73
474.91	3.04	26	3.3	-1.61	—	9.0	6.32	6.16
479.29	3.24	38	3.1	-0.03	-0.18	2.5	4.88	4.82
481.35	3.20	47	4.4	0.09	0.05	4.0	4.90	4.83
489.95	2.03	7	0.8	-1.77	—	8.0	4.70	4.68
509.50	2.03	13	1.1	-0.82	-1.77	4.0	3.89	3.86
514.98	1.73	10	0.9	-3.45	—	4.0	6.11	6.09
515.64	4.04	7	0.9	0.29	—	7.0	4.62	4.59
517.61	2.07	8	1.4	-2.01	—	12.0	5.23	5.17
521.27	3.50	15	1.9	-0.12	-0.23	7.0	4.89	4.83
524.79	1.78	15	1.5	-2.20	—	4.0	5.15	5.12
528.06	3.61	18	1.6	-0.08	-0.17	5.0	4.86	4.82
530.10	1.70	19	1.7	-2.24	-1.99	4.0	5.17	5.14
532.53	4.00	10	0.9	-1.33	—	7.0	6.19	6.16
533.15	1.78	12	1.5	-2.24	—	8.0	5.19	5.14
534.27	4.00	33	3.0	0.71	0.47	0.0	4.80	4.80
535.21	3.56	21	2.2	0.01	-0.15	4.0	4.90	4.84
545.46	4.05	14	1.2	-0.04	—	0.0	5.08	5.08
548.34	1.70	37	4.6	-0.49	-1.50	6.0	4.03	3.85
552.33	2.32	6	1.0	-0.81	—	9.0	4.08	4.04
553.08	1.70	12	1.4	-1.81	—	8.0	4.62	4.58
559.07	2.03	7	1.2	-2.07	—	10.0	5.13	5.09
564.72	2.27	12	1.3	-1.93	-1.63	5.0	5.27	5.24
608.24	3.50	6	1.2	0.16	—	8.0	4.29	4.27
609.31	1.73	7	0.7	-2.47	-2.33	6.0	4.93	4.92
618.90	1.70	6	0.8	-3.89	-2.34	8.0	6.38	6.36
641.78	2.32	9	1.5	-1.85	—	6.0	5.23	5.21
645.02	1.70	16	4.4	-1.84	—	13.0	5.24	5.06
645.50	3.62	9	1.3	-0.10	-0.38	5.0	4.70	4.68
647.79	3.76	3	0.3	-0.45	-0.75	0.0	4.50	4.50
663.24	2.27	6	0.7	-1.62	-1.83	5.0	4.59	4.58
677.10	1.87	9	1.7	-1.94	—	9.0	4.92	4.87
681.50	1.95	12	1.5	-1.88	-1.85	5.0	4.88	4.85
708.50	1.87	42	5.8	-1.35	—	4.0	5.09	4.96

Величина постоянной затухания γ с учетом влияния СТС найдена (путем согласования крыльев наблюдаемых [4] и теоретически вычисленных профилей линий $\lambda=608.76$; 609.31 и 618.89 нм) по формуле

$$\gamma = \alpha_3 T^{\beta_3} P_g k^{-1} T^{-1}, \quad (1)$$

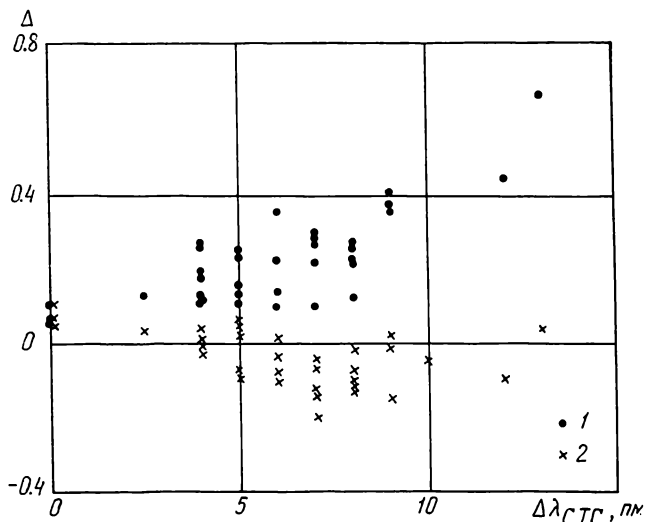
где $\alpha_3 = 0.25 \cdot 10^{-8}$, $\beta_3 = 0.3$.

Величина микротурбулентной скорости в данной работе не определялась, а согласно [5], $v_{\text{микро}}=1$ км/с. Значение макротурбулентной скорости, согласно той же работе, $v_{\text{макро}}=1.6$ км/с. С этими значениями $v_{\text{микро}}$, $v_{\text{макро}}$ выполнен расчет содержания кобальта для всех 37 линий по центральным глубинам и эквивалентным ширинам с учетом и без учета влияния СТС. Методика расчета теоретических профилей

изложена в работе [2]. Распределение макротурбулентной скорости предполагалось гауссовым.

Уширение вследствие СТС учитывалось путем прибавления к тепловой и микротурбулентным скоростям в выражении для доплеровской полуширины линии дополнительной «скорости»: $v_{\text{СТС}} = \Delta\lambda_{\text{СТС}} \cdot c \cdot \lambda^{-1}$. Этот метод значительно проще точных методов учета влияния СТС, применяемых в [3, 15], и, как следует из рисунка, дает довольно хорошие результаты.

Обсуждение полученных результатов. На рисунке представлена зависимость величины $\Delta = \lg A(\text{Co})(W) - \lg A(\text{Co})(d)$ от $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$ с учетом и без учета СТС. Влияние СТС бесспорно: Δ тем больше, чем



Зависимость величины $\Delta = \lg A(W) - \lg A(d)$ от значения $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$. 1 — без учета влияния эффектов СТС; 2 — с учетом СТС

больше $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$. К сожалению, наблюдается некоторая зависимость Δ от $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$ и в случае учета влияния СТС. Этот факт частично можно объяснить неточностью значений $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$, используемых в расчетах. Могут влиять также погрешности наблюдаемых эквивалентных ширин и центральных глубин линий, а также неучет изменения микро- и макротурбулентных составляющих поля скоростей с глубиной в солнечной атмосфере.

Таблица 3. Усредненные значения содержания кобальта в различных системах сил осцилляторов с учетом влияния СТС для моделей VAL и HOLMU

Литературный источник	Количество линий	$\lg A(\text{Co})(W)$ для моделей	
		VAL	HOLMU
Куруц — Пейтреман [16]	37	4.98 ± 0.73	5.06 ± 0.73
Кардон и др. [9]	22	4.95 ± 0.30	5.02 ± 0.30
Гуртовенко и др. [3]	17	4.89 ± 0.08	4.95 ± 0.08

Значения содержания кобальта, найденные по эквивалентным ширинам линий поглощения Co I с учетом и без учета влияния СТС, приведены в табл. 2. Расчеты выполнены для модели VAL [22] ($v_{\text{микро}} = 1$ км/с и $v_{\text{макро}} = 1.6$ км/с) в системе сил осцилляторов [16], как наиболее полной. Неучет влияния СТС приводит к завышению значения содержания кобальта (для отдельных линий $0.16 \div 0.18$ dex).

Усредненные по всем линиям значения содержания кобальта в зависимости от избранной системы сил осцилляторов и модели атмосферы представлены в табл. 3. Наименьшее значение средней квадратичной

ошибки отмечается в системе сил осцилляторов Гуртовенко и др. [3], которую и следует рекомендовать для определения химического содержания кобальта. Разность содержаний, полученных при расчетах по различным моделям солнечной атмосферы, порядка $0.06 \div 0.08$ dex и в случае применения киевских сил осцилляторов [3] соизмерима со средней квадратичной ошибкой определения среднего $\lg A(\text{Co})$. Как и для других химических элементов, большее значение содержания соответствует модели HOLMU [14].

Таким образом, наиболее вероятное содержание кобальта, определенное по слабым и умеренным линиям поглощения Co I с учетом влияния эффектов СТС, находится в пределах $4.89 \leq \lg A(\text{Co}) \leq 4.95$. Расчеты, выполненные только по слабым ($d \leq 21\%$) линиям, дают значения на 0.01 dex меньше. Следовательно, применение данной методики определения содержания Co с учетом влияния СТС к умеренным линиям вполне оправданно.

Автор благодарит Б. Т. Бабия за постановку задачи и Э. А. Гуртовенко за полезные советы и замечания, которые способствовали улучшению содержания работы.

1. Бабий Б. Т., Керык Р. Е., Кордуба Б. М. Определение содержания кобальта и ванадия в фотосфере Солнца по слабым фраунгоферовым линиям // Циркуляр Львов. астрон. обсерватории.— 1977.— № 52.— С. 25—28.
2. Бабий Б. Т., Кордуба Б. М., Рикалюк Р. Е. Теоретический расчет фраунгоферовых линий в невозмущенной фотосфере Солнца // Там же.— 1978.— № 53.— С. 32—41.
3. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., Орлова Т. В. Построение фундаментальных внутренних согласованных шкал сил осцилляторов и содержание химических элементов. Определение сил осцилляторов Co I по эквивалентным ширинам фраунгоферовых линий с учетом СТС // Астрон. журн.— 1983.— 60, № 4.— С. 758—762.
4. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., Орлова Т. В. и др. Профили избранных фраунгоферовых линий для разных положений центр—край на диске Солнца.— Киев: Наук. думка, 1975.—221 с.
5. Костык Р. И. Постоянная затухания и поле скоростей в фотосфере Солнца.— Киев, 1981.—46 с.— (Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-81-20Р).
6. Aller L. The abundance of the elements in the solar atmosphere // Adv. in Astronomy and Astrophys.— 1965.— N 3.— P. 1—25.
7. Biemont E. Computation of oscillator strengths by a semi-empirical method for some elements of the iron group and their solar photospheric abundances. IV. Results for V I, Co I. // Solar Phys.— 1978.—56, N 8.— P. 79—86.
8. Biemont E. Abundances of singly ionized elements of the iron—group in the Sun // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.— 1978.—184, N 3.— P. 683—694.
9. Cardon B. L., Smith P. L., Scalo J. M. et al. Absolute oscillator strengths lines of neutral cobalt between 2276 Å and 9357 Å and redetermination of solar cobalt abundance // Astrophys. J.— 1982.—260, N 1.— P. 395—412.
10. Engvold O., Hauge O. Elemental abundances, isotope ratios and molecular compounds in the solar atmosphere // Inst. Theoret. Astrophys. Blindern-Oslo.— 1974.— Rep. N 39.—25 p.
11. Goldberg L., Müller E., Aller L. The abundances of the elements in the solar atmosphere // Astrophys. J. Suppl. Ser.— 1960.—5, N 45.— P. 1—138.
12. Hauge O., Engvold O. Compilation of solar abundance data // Inst. Theoret. Astrophys. Blindern-Oslo.— 1977.— Rep. N 49.—23 p.
13. Holweger H. Ein empirisches Model des Sonnenatmosphäre mit lokalen thermodynamischen Gleichgewicht // Z. f. Astrophys.— 1967.—65, N 5.— S. 365—417.
14. Holweger H., Müller E. // Solar Phys.— 1974.—39, N 1.— P. 19—30.
15. Holweger H., Oertel K. B. // Astron. and Astrophys.— 1971.— 10, N 3.— P. 434—436.
16. Kurucz R., Peytremann E. Tables of semiempirical gf-values // Smith. Astrophys. Observ. Spec. Rep.— 1975.— N 362.—1219 p.
17. Margrave T. E. // Solar Phys.— 1972.—27, N 2.— P. 294—298.
18. Müller E., Mutschlechner J. // Astrophys. J. Suppl. Ser.— 1964.— N 85.— P. 1—64.
19. Pagel B. E. Solar abundance. A new table / Oct. 1976 / Origin and distribution elements. Proc. 2 Symp., Paris, 1977.— Oxford, 1979.— P. 79—80.
20. Ross I., Aller L. // Science.— 1976.—191, N 4133.— P. 1223—1229.
21. Russel H. // Astrophys. J.— 1929.—70, N 1.— P. 11—82.
22. Vernazza L., Avrett E., Loeser R. // Astrophys. J. Suppl. Ser.— 1981.— 45, N 4.— P. 635—725.
23. Warner B. // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.— 1968.— 138, N 2.— P. 229—243.