

УДК 523.774

Силы осцилляторов линий элементов группы железа

Э. А. Гуртовенко, Р. И. Костык, Т. В. Орлова

Дана общая оценка значимости работы и подведены итоги построения солнечных систем сил осцилляторов линий группы железа. Приведены сведения о количестве исследованных линий и соответствующих публикациях.

На основании сравнения солнечных сил осцилляторов с точнейшими лабораторными значениями gf избранных линий, полученными в Оксфорде, внутренняя средняя квадратичная ошибка солнечных систем сил осцилляторов оценивается величиной ≤ 0.07 dex.

OSCILLATOR STRENGTHS FOR THE LINES OF IRON GROUP ELEMENTS, by Gurtovenko E. A., Kostik R. I., Orlova T. V.— Significance of the work on the establishment of the solar gf -scales for the Fraunhofer lines of the elements of iron group is evaluated in general, and the results of the work are summed up. The information on the number of lines investigated is given as well as on the number of corresponding publications. The comparison of the solar gf -scales with the highest precision values of the oscillator strengths for selected lines obtained in Oxford gives the r.m.s. internal error of the solar gf -scales ≤ 0.07 dex.

Введение. Многие задачи солнечной и звездной физики решаются путем анализа профилей и эквивалентных ширин спектральных линий, которые зависят от трех важнейших факторов: 1) модели атмосферы со всеми ее физическими и кинематическими характеристиками; 2) содержания химических элементов (A); 3) сил осцилляторов (gf).

И хотя в ряде случаев необходимы лишь значения произведения Agf конкретной линии, это не намного упрощает задачу, поскольку величина Agf может быть получена с удовлетворительной точностью, только если ошибки A и gf взаимно скомпенсированы, т. е. использование содержания и сил осцилляторов из независимых источников приводит, как правило, к значительным погрешностям. Примером являются результаты исследования микротурбулентной скорости и постоянной затухания [2, 3, 4]. Поэтому параметр Agf часто предварительно находят по спектральной линии с последующим его применением для решения основной проблемы.

В последние годы при решении астрофизических задач требуются очень точные сведения о содержании химических элементов в недрах Солнца и звезд. Особенно необходимы они для Солнца, результаты исследования которого применяются как стандарт в звездной физике. Этот вопрос широко освещен в работе [6]. Однако его решение тормозится недопустимо низкой точностью имеющихся в литературе значений сил осцилляторов. Исключением являются лишь работы оксфордской группы Блэкуэлла [7—10], в которых практически с идеальной точностью определены значения gf избранных линий железа, титана и хрома.

Знание высокоточных сил осцилляторов открывает большие возможности при изучении солнечной и звездных фотосфер, однако в настоящее время количество линий, для которых они получены с такой точностью, незначительно. В связи с этим нами была поставлена следующая задача: определить силы осцилляторов по данным наблюдений фраунгоферовых линий, используя солнечную фотосферу как уже достаточно изученную среду.

Поскольку практически в этой задаче мы находим не gf , а произведение Agf , то полученные величины сил осцилляторов могут иметь следующие ошибки: систематическую, равную поправке (с обратным знаком) к принятому в вычислениях содержанию химического элемента; случайную, а, возможно, и систематическую, обусловленную наблюдениями; систематическую, зависящую, в основном, от отклонения принятой модели фотосферы от реальной картины ее строения (она может сильно зависеть от атомных параметров и силы конкретной линии).

Таблица 1. Основные сведения об опубликованных авторами значениях солнечных сил осцилляторов линий элементов группы железа. Обозначения «по d » и «по W » относятся соответственно к данным, полученным по центральным интенсивностям и эквивалентным ширинам.

Элемент	Количество линий		Название издания, год и номер выпуска
	по W	по d	
Sc I	12	—	Кинематика и физика небесных тел, 1985, 1, № 1, с. 75—76
Sc II	19	—	Там же
Ti I	133	133	Астрон. журн., 1982, 59, с. 693—698
Ti II	27	—	Астрометрия и астрофизика, 1983, вып. 49, с. 39—41
V I	55	—	Кинематика и физика небесных тел, 1985, 1, № 2, с. 62—64
V II	17	—	Данная работа
Cr I	135	135	Киев, 1982.—36 с. — (Препринт / АН УССР, Ин-т теорет. физики; ИТФ-82-33Р)
Cr II	29	—	Астрометрия и астрофизика, 1983, вып. 49, с. 39—41
Mn I	30	—	Солнечные данные, 1984, № 9, с. 85—87
Fe I	865	865	Киев, 1980.—45 с. — (Препринт / АН УССР, Ин-т теорет. физики; ИТФ-79-138Р); Astron. and Astrophys., Suppl. Ser., 1981, 46, p. 239—248; Ibid., 1982, 47, p. 193—197; Киев, 1982.—36 с. — (Препринт / АН УССР, Ин-т теорет. физики; ИТФ-82-33Р)
Fe II	59	—	Астрометрия и астрофизика, 1982, вып. 47, с. 32—34
Co I	50	—	Астрон. журн., 1983, 60, с. 758—762
Ni I	114	175	Астрометрия и астрофизика, 1982, вып. 46, с. 58—61 Киев, 1982.—36 с. — (Препринт / АН УССР, Ин-т теорет. физики; ИТФ-82-33Р)
Cu I	3	—	Данная работа
Zn I	5	—	Данная работа

Перечисленные ошибки не мешают аргументировать целесообразность создания таких систем сил осцилляторов, поскольку: систематическая ошибка, обусловленная погрешностью принятой величины содержания A , может быть затем легко учтена, если окажутся известными с высокой абсолютной точностью силы осцилляторов хотя бы нескольких линий из всего массива солнечный gf ; ошибки наблюдений, выполненных с помощью современных солнечных спектрографов, незначительны ($\sim 0.5\%$ в остаточных интенсивностях линий и несколько процентов в эквивалентных ширинах); ошибки третьего рода наиболее опасны. Однако, как показали наши исследования [13, 14], они заключены в пределах $0.06—0.08$ dex.

Отметим также преимущества солнечных систем сил осцилляторов: 1) они внутренне согласованы с принятой величиной содержания, т. е. полная ошибка произведения Agf является минимальной по сравнению с ошибками A и gf ; 2) анализ разностей значений gf , найденных по эквивалентным ширинам и центральным интенсивностям, а также разностей солнечных и точных лабораторных значений gf , оказывается эффективным средством для исследования фотосферной модели, с которой выполнены расчеты, а также для проверки теории расчета профилей линий.

В данной работе подведены итоги определения солнечных сил осцилляторов избранных линий элементов группы железа.

Результаты. Силы осцилляторов 1614 неблендированных в спектре Солнца линий Sc I, Sc II, Ti I, Ti II, V I, V II, Cr I, Cr II, Fe I, Fe II, Mn I, Co I, Ni I, Cu I, Zn I в области длин волн 400—800 нм опубликованы в наших работах, выполненных в течение нескольких последних лет. Сведения о количестве линий, используемом методе и издании, где опубликована соответствующая работа, приведены в табл. 1.

Таблица 2. Сравнение солнечных сил осцилляторов линий Fe I с оксфордскими

λ , нм	EPL, эВ	d , %	W , нм	lggf(K)		lggf(O)	lggf(K)—lggf(O)	
				по d	по W		по d	по W
423.272	0.11	0.782	5.7	-4.88	-4.90	-4.92	+0.04	+0.02
434.724	0.00	0.608	4.2	-5.52	-5.44	-5.49	-0.03	+0.05
438.924	0.05	0.833	7.3	-4.65	-4.50	-4.57	-0.08	+0.07
444.284	2.18	0.760	6.3	-2.86	-2.78	-2.79	-0.07	+0.01
444.548	0.09	0.589	3.9	-5.45	-5.43	-5.43	-0.02	0.00
447.168	0.11	0.305	1.9	-5.91	-5.91	-5.99	0.00	+0.08
460.201	1.61	0.798	7.1	-3.19	-3.15	-3.15	-0.04	0.00
468.030	1.61	0.604	4.7	-3.82	-3.80	-3.77	-0.05	-0.03
473.360	1.48	0.822	8.3	-3.03	-3.00	-2.99	-0.04	-0.01
493.969	0.86	0.837	9.7	-3.39	-3.26	-3.34	-0.05	+0.08
499.413	0.91	0.835	10.1	-3.31	-3.20	-3.08	-0.23	-0.12
507.974	0.99	0.825	9.6	-3.24	-3.21	-3.22	-0.02	+0.01
508.334	0.96	0.849	10.9	-2.99	-3.03	-2.96	-0.03	-0.07
510.765	1.56	0.833	11.5	-2.40	-2.35	-2.42	+0.02	+0.07
512.372	1.01	0.828	10.1	-3.09	-3.08	-3.07	-0.02	-0.01
512.736	0.91	0.830	9.1	-3.32	-3.41	-3.31	-0.01	-0.10
512.768	0.05	0.157	1.6	-6.08	-6.13	-6.12	+0.04	-0.01
515.192	1.01	0.810	8.7	-3.33	-3.41	-3.32	-0.01	-0.09
519.494	1.56	0.846	14.0	-2.06	-2.05	-2.09	+0.03	+0.04
519.872	2.22	0.802	9.5	-2.14	-2.16	-2.13	-0.01	-0.03
521.628	1.61	0.837	12.7	-2.14	-2.16	-2.15	+0.01	-0.01
522.553	0.11	0.750	7.2	-4.80	-4.72	-4.79	-0.01	+0.07
524.705	0.09	0.730	6.7	-4.96	-4.88	-4.95	-0.01	+0.07
525.021	0.12	0.727	6.7	-4.94	-4.86	-4.94	0.00	+0.08
530.737	1.61	0.770	8.5	-3.08	-2.96	-2.99	-0.09	+0.03
550.678	0.99	0.825	11.6	-2.83	-2.95	-2.80	-0.03	-0.15
595.670	0.86	0.545	5.4	-4.62	-4.54	-4.60	-0.02	+0.06
608.271	2.22	0.378	3.3	-3.65	-3.67	-3.57	-0.08	-0.10
613.700	2.20	0.616	6.2	-3.01	-3.05	-2.95	-0.06	-0.10
615.162	2.18	0.517	4.8	-3.36	-3.40	-3.30	-0.06	-0.10
617.334	2.22	0.638	6.6	-2.94	-2.95	-2.88	-0.06	-0.07
620.032	2.61	0.643	7.5	-2.49	-2.39	-2.44	-0.05	+0.05
621.929	2.20	0.712	9.0	-2.46	-2.44	-2.43	-0.03	-0.01
625.256	2.40	0.752	13.0	-1.67	-1.64	-1.69	+0.02	+0.05
628.063	0.86	0.628	6.2	-4.35	-4.38	-4.39	+0.04	+0.01
629.780	2.22	0.658	7.4	-2.75	-2.80	-2.74	-0.01	-0.06
632.269	2.59	0.640	7.5	-2.44	-2.43	-2.43	-0.01	0.00
643.085	2.18	0.738	10.9	-1.99	-2.12	-2.01	+0.02	-0.11
648.188	2.28	0.588	6.8	-3.02	-2.91	-2.98	-0.04	+0.07
649.895	0.96	0.470	4.4	-4.70	-4.71	-4.70	-0.01	-0.01
659.388	2.43	0.663	8.8	-2.45	-2.33	-2.46	+0.01	+0.13
660.912	2.56	0.573	6.8	-2.74	-2.65	-2.69	-0.05	+0.04
694.521	2.42	0.635	8.5	-2.46	-2.45	-2.52	+0.06	+0.07
697.886	2.48	0.623	8.4	-2.47	-2.42	-2.52	+0.05	+0.10
791.287	0.86	0.400	4.9	-4.88	-4.83	-4.85	-0.03	+0.02

Примечание: К — Киев; О — Оксфорд

Основы метода определения сил осцилляторов по центральным интенсивностям и эквивалентным ширинам линий изложены в работах [13, 14], а с учетом сверхтонкой структуры линий — в [1]. Во всех расчетах принималось наиболее вероятное, по нашему мнению, значение содержания химических элементов, фотосферные модели Холвегера —

Мюллер [16] и Гарвард — Смитсоновская [12], обоснованные нами значения постоянной затухания $\gamma=1,5\gamma_0$ и микротурбулентной скорости (для центра диска Солнца) $v_{\text{микро}}=0,9 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ [13, 14]. Нами было показано, что внутренняя средняя квадратичная погрешность солнечных сил осцилляторов заключена в пределах $(0.06-0.09) \text{ dex}$ [13, 14]. Сейчас, благодаря упомянутым выше работам оксфордской группы Блэк-уэлла, имеется возможность независимо и наиболее объективно проверить точность наших значений gf . Сравнение обеих систем сил осцилляторов по общим линиям приведено в табл. 2—4. Мы вычислили средние разности $\lg gf$ (Киев) — $\lg gf$ (Оксфорд), а также средние квадратичные значения этих разностей. Они обозначены соответственно через Δ и ε и приведены в табл. 5. Дадим их краткий анализ.

Таблица 3. Сравнение солнечных сил осцилляторов линий Ti I с оксфордскими

λ , нм	EPL, эВ	d, %	W, пм	$\lg gf(K)$		$\lg gf(O)$	$\lg gf(K) - \lg gf(O)$	
				по d	по W		по d	по W
456.263	0.02	0.155	0.93	-2.54	-2.64	-2.66	+0.12	+0.02
468.191	0.05	0.792	7.2	-1.11	-1.18	-1.07	-0.04	-0.11
499.709	0.00	0.396	3.1	-2.01	-2.07	-2.12	+0.11	+0.05
500.965	0.02	0.317	2.7	-2.14	-2.14	-2.26	+0.12	+0.12
514.748	0.00	0.460	3.5	-1.90	-2.01	-2.01	+0.11	0.00
515.218	0.02	0.443	3.4	-1.91	-2.01	-2.02	+0.11	+0.01
521.038	0.05	0.786	8.7	-1.02	-0.97	-0.88	-0.14	-0.09

Таблица 4. Сравнение солнечных сил осцилляторов линий Cr I с оксфордскими

λ , нм	EPL, эВ	d, %	W, пм	$\lg gf(K)$		$\lg gf(O)$	$\lg gf(K) - \lg gf(O)$	
				по d	по W		по d	по W
437.326	0.98	0.562	4.4	-2.40	-2.28	-2.35	-0.05	+0.07
441.225	1.03	0.390	2.7	-2.65	-2.62	-2.70	+0.05	+0.08
496.493	0.94	0.479	3.5	-2.56	-2.59	-2.53	-0.03	-0.06
507.292	0.94	0.358	3.1	-2.78	-2.68	-2.73	-0.05	+0.05
524.757	0.96	0.752	7.9	-1.61	-1.63	-1.63	+0.02	0.00
530.075	0.98	0.616	5.6	-2.21	-2.15	-2.13	-0.08	-0.02

Таблица 5. Результаты сравнения солнечных и оксфордских сил осцилляторов для общих линий Fe I, Ti I, Cr I; n — количество сравниваемых линий

Элемент	n	Δ		ε	
		по d	по W	по d	по W
Fe I	45	-0.019 ± 0.048	$+0.007 \pm 0.068$	± 0.05	± 0.07
Ti I	7	$+0.056 \pm 0.039$	0.000 ± 0.029	± 0.12	± 0.08
Cr I	6	-0.023 ± 0.015	$+0.020 \pm 0.023$	± 0.06	± 0.06

Средняя разность Δ содержит ошибку принятой величины содержания химического элемента и систематическую ошибку метода, обусловленную неточностями фотосферной модели и теории расчета профилей линий. Она небольшая и находится в пределах $(-0.02 \div +0.06) \text{ dex}$. Однако реальность средних разностей Δ можно оспаривать, так как они сравнимы с их средними квадратичными ошибками или меньше их. Поэтому последние не определяют полную внутреннюю погрешность наших систем сил осцилляторов, а только ее нижний предел, который

по данным табл. 5 равен в среднем $\pm 0,04$ dex. Верхний же предел дает величина ϵ , которая в среднем по данным табл. 5 равна $\pm 0,07$ dex. Таким образом, внутренняя средняя квадратичная погрешность солнечных систем сил осцилляторов, найденная в результате сравнения с точнейшими лабораторными значениями gf , заключена в пределах $0.04 \text{ dex} \leq \delta \lg gf \leq 0.07 \text{ dex}$, что не противоречит нашим предыдущим оценкам, полученным совершенно другим методом [13, 14]. Приведенные величины погрешности относятся только к силам осцилляторов линий,

Таблица 6. Силы осцилляторов избранных линий ионизованного ванадия

λ , нм	$EPL_{\text{ЭВ}}$	d , %	W , пм	$\lg gf(W)$	λ , нм	$EPL_{\text{ЭВ}}$	d , %	W , пм	$\lg gf(W)$
400.817	1.79	0.150	1.37	-1.86	488.344	3.79	0.070	0.71	-0.46
403.677	1.48	0.461	3.59	-1.52	488.405	3.76	0.077	0.69	-0.50
403.957	1.82	0.152	1.17	-1.92	524.118	4.52	0.005	0.055	-0.92
405.105	1.80	0.157	1.07	-1.99	530.322	2.27	0.046	0.40	-2.11
419.089	2.03	0.068	0.65	-2.03	538.487	2.27	0.013	0.15	-2.54
422.521	2.03	0.360	3.66	-1.02	543.930	2.27	0.015	0.18	-2.48
423.422	1.69	0.120	0.86	-2.21	581.993	2.52	0.038	0.37	-1.95
434.996	2.04	0.030	0.23	-2.51	592.888	2.52	0.056	0.55	-1.77
456.457	2.27	0.200	1.85	-1.30					

Таблица 7. Силы осцилляторов избранных линий нейтральной меди

λ , нм	$EPL_{\text{ЭВ}}$	d , %	W , пм	$\lg gf(W)$
510.554	1.39	0.718	9.3	-0.87
521.821	3.82	0.518	4.9	+0.34
522.009	3.82	0.138	1.2	-0.60

Таблица 8. Силы осцилляторов избранных линий нейтрального цинка

λ , нм	$EPL_{\text{ЭВ}}$	d , %	W , пм	$\lg gf(W)$
462.980	5.79	0.021	0.12	-1.12
468.014	4.00	0.478	3.8	-0.95
472.216	4.03	0.690	7.2	-0.08
481.054	4.08	0.696	7.0	-0.08
636.235	5.79	0.173	2.1	+0.19

которые не подвержены влиянию сверхтонкой структуры (СТС). Сравнение значений gf , найденных с учетом и без учета СТС, показывает существенное различие, причем разности $\lg gf$ (без СТС) — $\lg gf$ (СТС) положительные и сильно зависят от эквивалентной ширины. Для линий нейтрального кобальта с $W \approx 10$ пм эта разность достигает 0.5 dex и практически равна нулю для $W \leq 2$ пм [1]. Поскольку надежные сведения о СТС имеются для небольшого числа линий лишь некоторых элементов, то это ограничивает возможности определения сил осцилляторов линий атомов и ионов, обладающих сверхтонкой структурой. Однако во всех количественных расчетах по физике Солнца силы осцилляторов, найденные по эквивалентным ширинам линий без учета СТС, не влияют на результаты исследований, в которых используются эквивалентные ширины. Принимаемое значение содержания химического элемента должно быть при этом согласовано с величиной gf , а эквивалентные ширины линий следует рассчитывать без учета СТС. Полученные таким путем солнечные силы осцилляторов могут использоваться и в исследованиях звездных атмосфер, спектры которых близки к спектру Солнца. Заметим, что сравнение результатов расчета gf по центральным интенсивностям и эквивалентным ширинам позволяет обнаружить СТС у тех линий, у которых она предполагается. Как и микротурбулентная скорость, СТС увеличивает эквивалентные ширины и уменьшает центральные интенсивности линий. Поэтому определяемые по эквивалентной ширине силы осцилляторов линий, обладающих СТС, будут завышены, а по центральной интенсивности — занижены.

Силы осцилляторов избранных линий V II, Cu I и Zr I. Результаты, завершающие составление солнечных систем сил осцилляторов линий химических элементов группы железа, приведены в табл. 6—8. Эквивалентные ширины линий взяты из работы Бьемона [5], а также определены нами по Льежскому атласу солнечного спектра [11]. Содержание ванадия $\lg A(V) = 4.1$ принято среднее по рекомендуемым данным [5, 15, 17]. Содержание меди $\lg A(Cu) = 4.1$ и содержание цинка $\lg A(Zn) = 4.4$ взяты по рекомендуемым данным [15, 17]. Как и в предыдущих исследованиях, использовалась модель Холвегера — Мюллер, постоянная затухания $\gamma = 1.5\gamma_6$ и микротурбулентная скорость $u_{\text{микро}} = 0,9 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$.

Заключение. Общий анализ методов и результатов составления солнечных систем сил осцилляторов и содержания химических элементов показывает, что внутренняя средняя квадратичная погрешность таких систем не выше 0.07 dex.

Полученные значения сил осцилляторов большого числа линий химических элементов группы железа (табл. 1) могут успешно использоваться в работах по солнечной физике и в исследованиях звездных атмосфер. В частности, они могут быть очень полезны для массовых исследований содержания химических элементов в звездах различных типов, что особенно важно для решения проблем ядерного синтеза в недрах звезд и их эволюции.

1. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., Орлова Т. В. Построение солнечных внутренне согласованных сил осцилляторов и содержание химических элементов. Co I. — Астрон. журн., 1983, 60, с. 758—762.
2. Гуртовенко Э. А., Ратникова В. А. Изучение микротурбулентности по эквивалентным ширинам умеренных и умеренно-сильных линий Fe I. — Астрометрия и астрофизика, 1976, вып. 30, с. 14—25.
3. Кондрашова Н. Н., Гуртовенко Э. А. Определение постоянной затухания по крыльям сильных линий Бельгийского атласа солнечного спектра. — Там же, 1980, вып. 42, с. 14—26.
4. Шеминова В. А., Гуртовенко Э. А. Комплексное изучение микротурбулентной скорости и параметра затухания в солнечной фотосфере. III. — Там же, 1979, вып. 38, с. 29—36.
5. Biemont E. Computation of oscillator strengths by a semi-empirical method for some elements of the iron-group and their solar photospheric abundance. — Solar Phys., 1978, 56, p. 79—86.
6. Biemont E., Grevesse N. f-values and abundances of the elements in the Sun and stars. — Phys. scr., 1977, 16, p. 39—47.
7. Blackwell D. E., Ibbetson P. A., Petford A. D., Shallis M. J. Precision measurements of oscillator strengths. IV. — Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 1979, 186, p. 633—650.
8. Blackwell D. E., Mennon S. L. R., Petford A. D. Measurements of relative oscillator strengths for Cr I lines. I. — Ibid., 1984, 207, p. 533—546.
9. Blackwell D. E., Petford A. D., Shallis M. J. Precision measurements of relative oscillator strengths. VII. — Ibid., 1979, 186, p. 657—668.
10. Blackwell D. E., Petford A. D., Shallis M. J., Leggett S. Precision measurement of relative oscillator strengths Ti I. I. — Ibid., 1982, 199, p. 21—31.
11. Delbouille L., Neven L., Roland C. Photometric atlas of the solar spectrum from λ 300 to λ 10 000. — Liège, 1973.
12. Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Gony J. The Harvard-Smithsonian reference atmosphere. — Solar Phys., 1971, 18, p. 347—365.
13. Gurtovenko E. A., Kostik R. I. On the establishment of internally consistent solar scales of oscillator strengths and abundances of chemical elements. I. — Astron. and Astrophys. Suppl., 1981, 46, p. 239—248.
14. Gurtovenko E. A., Kostik R. I. On the establishment of internally consistent solar scales of oscillator strengths and abundances of chemical elements. II. — Ibid., 1982, 47, p. 193—197.
15. Hauge O., Engvold O. Compilation of solar abundance data. — Blindern; Oslo, 1974. — 23 p. — (Report / Intern. Theor. Astrophys.; N 49).
16. Holweger H., Muller E. A. The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision of Ba II lines by hydrogen. — Solar Phys., 1974, 39, p. 19—30.
17. Ross J. R., Aller L. H. The chemical composition of the Sun. — Science, 1976, 191, N 4233, p. 1293—1299.