

УДК 523.94

## Силы осцилляторов линий железа

Р. И. Костык, Т. В. Орлова

По наблюдаемым в спектре Солнца центральным интенсивностям и эквивалентным ширинам фраунгоферовых линий определены силы осцилляторов 380 линий железа. Средняя квадратичная погрешность не превышает 12 %.

*OSCILLATOR STRENGTHS OF IRON LINES*, by Kostyk R. I., Orlova T. V. — Oscillator strengths of 380 iron lines have been determined from the observed central intensities and equivalent widths of the Fraunhofer solar lines with the r. m. s. error not exceeding 12 %.

Повышение точности спектральных наблюдений (а с появлением монохроматоров двойной дифракции и Фурье-спектрографов погрешность регистрации спектральных линий уменьшилась от нескольких процентов до нескольких десятых долей процента) потребовало пересмотра ряда атомных констант и в первую очередь сил осцилляторов  $gf$ . Величины

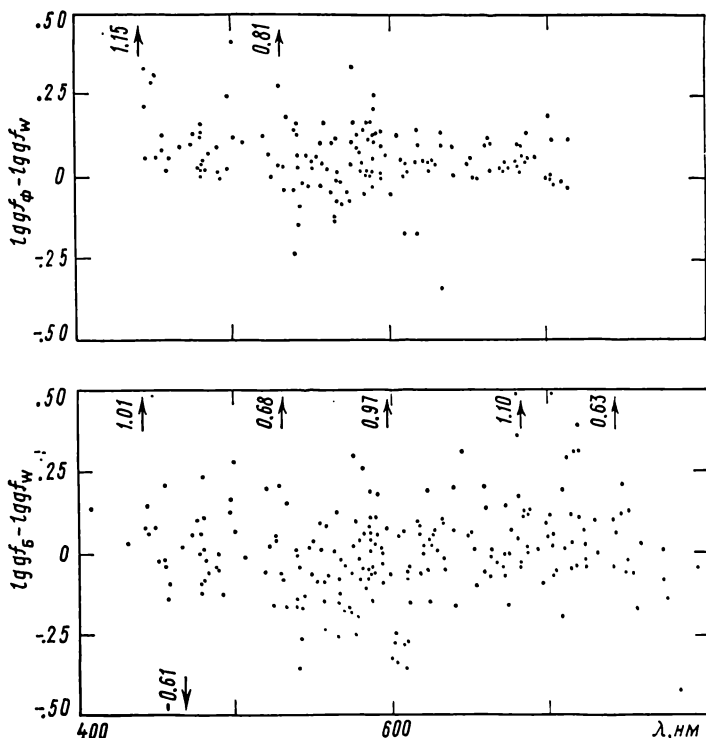


Рис. 1. Разность «солнечных» значений сил осцилляторов  $lg gf(W)$  и величин  $lg gf$ , приведенных в работах [7] (вверху) и [1] (внизу)

$gf$  линий железа определялись неоднократно, однако только для сравнительно небольшого числа линий (около ста) экспериментальные значения  $gf$  найдены с погрешностью, не превышающей 10 % [5, 6]. А для многих линий железа, представляющих астрофизический интерес, значения  $gf$  вовсе неизвестны. Например, в солнечном спектре в области длин волн 500—550 нм отождествлены 470 линий FeI и только для 177 из них определены величины  $gf$  [4]. Подробный перечень публикаций по силам осцилляторов линий железа приводится в работах [4, 7].

Таблица 1. Силы осцилляторов линий нейтрального железа

$\lambda$ , нм	$lggf(W)$	$lggf(d)$	$\lambda$ , нм	$lggf(W)$	$lggf(d)$	$\lambda$ , нм	$lggf(W)$	$lggf(d)$
404.1913	-3.15	-3.14	524.3779	-1.09	-1.11	575.2038	-0.97	-1.02
409.1556	-2.27	-2.30	525.0210	-4.98	-4.93	575.4406	-2.97	-2.94
419.4490	-3.42	-3.43	525.3020	-3.97	-3.93	575.9259	-2.20	-2.19
428.1594	-4.17	-4.15	526.2619	-2.33	-2.38	576.0342	-2.59	-2.58
431.9445	-3.67	-3.68	527.9652	-3.67	-3.72	576.0527	-3.33	-3.28
439.2302	-3.03	-3.21	529.4540	-2.83	-2.83	577.5083	-1.17	-1.23
441.3392	-2.61	-2.75	529.5306	-1.66	-1.69	577.8461	-3.61	-3.62
443.9639	-3.10	-3.12	530.0394	-2.49	-2.54	578.4663	-2.73	-2.74
443.9887	-3.08	-3.10	530.1312	-2.88	-2.93	579.3918	-1.72	-1.78
444.5476	-5.50	-5.45	530.8681	-2.67	-2.66	580.6728	-1.00	-1.03
448.5971	-2.56	-2.59	532.0032	-2.66	-2.67	580.7984	-2.67	-2.70
450.4212	-3.40	-3.43	532.1109	-1.33	-1.42	580.9875	-3.16	-3.20
452.3404	-1.98	-2.04	532.6812	-2.16	-2.22	581.1912	-2.51	-2.50
454.3223	-3.44	-3.45	535.8111	-3.33	-3.37	581.4814	-1.95	-2.00
454.6470	-2.63	-2.67	537.6827	-2.20	-2.18	582.7872	-3.29	-3.32
455.1650	-2.12	-2.12	537.9574	-1.58	-1.63	583.5099	-2.31	-2.30
455.6929	-2.72	-2.82	538.6330	-1.84	-1.87	583.7702	-2.44	-2.45
456.6025	-3.35	-3.45	538.9481	-0.55	-0.41	584.4921	-3.09	-3.10
457.4220	-2.45	-2.57	539.5216	-1.87	-1.89	584.9687	-3.09	-3.12
459.3528	-2.05	-2.14	539.8280	-0.73	-0.66	585.2219	-1.28	-1.36
460.7087	-3.64	-3.66	540.1265	-1.88	-1.89	585.3150	-5.23	-5.27
463.0779	-3.23	-3.20	540.6776	-1.50	-1.58	585.5084	-1.71	-1.72
465.8299	-3.06	-3.09	541.2786	-1.93	-1.96	585.6090	-1.69	-1.74
467.2837	-4.13	-4.31	541.7036	-1.52	-1.60	585.8776	-2.32	-2.38
470.6304	-3.09	-3.13	542.2149	-2.33	-2.37	585.9590	-0.65	-0.65
471.6838	-3.55	-3.59	543.6290	-1.45	-1.49	586.1110	-2.49	-2.55
472.6141	-3.28	-3.31	543.8028	-2.77	-2.82	586.2364	-0.40	-0.42
474.5131	-4.23	-4.21	544.3402	-3.04	-3.15	587.6276	-2.85	-2.85
476.0065	-3.76	-3.73	546.4279	-1.72	-1.75	587.9490	-2.13	-2.17
477.9443	-2.27	-2.30	547.0089	-1.71	-1.78	588.0025	-2.08	-2.12
478.0812	-3.41	-3.46	549.1829	-2.36	-2.42	588.1281	-1.90	-1.96
478.7494	-4.31	-4.34	549.4464	-2.07	-2.10	588.3823	-1.26	-1.40
478.8761	-1.74	-1.88	549.9587	-2.82	-2.86	590.2472	-1.99	-1.98
479.0562	-2.59	-2.60	552.1281	-2.64	-2.58	590.5674	-0.85	-0.88
479.0745	-3.40	-3.43	552.2442	-1.55	-1.57	592.7785	-1.16	-1.21
479.3969	-3.62	-3.66	552.4244	-2.97	-2.98	592.9678	-1.34	-1.37
479.4360	-4.02	-4.08	553.9278	-2.70	-2.76	593.0182	-0.30	-0.23
479.8267	-1.53	-1.57	554.6989	-1.95	-2.03	593.3805	-2.27	-2.37
479.9066	-2.87	-2.92	555.2687	-1.90	-1.93	593.4662	-1.11	-1.25
480.2527	-1.83	-1.93	556.0209	-1.17	-1.16	594.7531	-2.17	-2.24
480.8152	-2.74	-2.80	556.8862	-3.05	-3.02	595.6702	-4.68	-4.63
480.9941	-2.67	-2.73	557.7023	-1.62	-1.67	596.9567	-2.85	-2.89
483.5871	-1.50	-1.53	558.7571	-1.81	-1.81	597.6169	-3.29	-3.32
488.5435	-1.17	-1.16	559.5051	-1.91	-1.95	597.6786	-1.37	-1.43
489.2861	-1.30	-1.42	560.8976	-2.44	-2.52	598.4823	-0.26	-0.34
490.5137	-2.00	-2.10	560.9965	-3.32	-3.40	600.3017	-1.04	-1.13
490.8610	-4.25	-4.28	561.1357	-3.06	-3.08	600.7965	-0.81	-0.83
491.7234	-1.11	-1.15	561.8634	-1.42	-1.42	600.8561	-0.93	-1.02
495.4304	-3.26	-3.31	561.9597	-1.59	-1.66	601.5242	-4.81	-4.79
496.1920	-2.47	-2.51	563.5821	-1.69	-1.73	601.9369	-3.37	-3.47
496.2577	-1.25	-1.36	563.6700	-2.66	-2.65	602.7055	-1.27	-1.18
498.7624	-3.01	-3.04	564.1439	-0.99	-1.19	603.4037	-2.52	-2.53
499.2786	-2.39	-2.47	564.4356	-3.31	-3.43	605.4077	-2.40	-2.42
499.5411	-2.23	-2.27	564.9991	-0.87	-0.92	605.6008	-0.48	-0.45
501.6477	-1.72	-1.75	565.1469	-1.92	-1.93	606.5490	-1.60	-1.50
504.7117	-2.51	-2.52	565.2316	-1.81	-1.93	607.8495	-0.39	-0.37
505.8494	-2.89	-2.89	566.1017	-2.55	-2.58	607.9013	-1.06	-1.14
511.9906	-3.10	-3.17	566.1343	-1.94	-2.01	608.9570	-0.97	-0.99
514.1739	-2.02	-2.22	567.7689	-2.77	-2.80	609.3647	-1.49	-1.51
514.5733	-3.16	-3.40	567.8388	-3.11	-3.19	609.4376	-1.70	-1.77
515.9947	-2.75	-2.75	568.0244	-2.43	-2.50	609.6669	-1.88	-1.97
518.7908	-1.32	-1.41	570.1550	-2.18	-2.20	609.7087	-5.15	-5.13
519.6057	-0.83	-0.82	570.7260	-3.66	-3.66	609.8249	-1.96	-1.96
520.5287	-3.13	-3.10	571.7834	-1.02	-1.12	612.0258	-6.00	-6.01
520.6808	-2.62	-2.67	573.1767	-1.16	-1.20	615.1622	-3.40	-3.36
521.3804	-2.89	-2.88	573.8233	-2.36	-2.43	615.7405	-3.94	-3.97
522.3182	-2.39	-2.40	574.1851	-1.77	-1.82	615.7732	-1.34	-1.26
523.8243	-3.20	-3.30	574.2963	-2.48	-2.49	615.9383	-2.01	-2.07

Продолжение табл. 1

$\lambda$ , нм	$\lg gf(W)$	$\lg gf(d)$	$\lambda$ , нм	$\lg gf(W)$	$\lg gf(d)$	$\lambda$ , нм	$\lg gf(W)$	$\lg gf(d)$
616.5364	-1.58	-1.60	675.0158	-2.69	-2.56	715.1474	-3.75	-3.77
617.3342	-2.82	-2.91	675.3465	-2.48	-2.50	715.5636	-1.09	-1.17
618.7402	-4.26	-4.33	675.6547	-2.91	-3.06	718.0000	-4.87	-4.84
618.7994	-1.71	-1.82	678.6863	-2.05	-2.09	718.9156	-2.85	-2.86
619.9509	-4.48	-4.53	679.3260	-2.57	-2.57	719.0126	-3.47	-3.49
620.0320	-2.47	-2.45	679.6120	-2.54	-2.63	721.2440	-1.19	-1.26
621.3436	-2.63	-2.64	680.1869	-5.95	-5.88	721.9688	-1.71	-1.69
622.0781	-2.50	-2.54	680.4275	-1.99	-2.02	722.1206	-1.37	-1.41
622.6740	-2.20	-2.27	680.6849	-3.27	-3.24	722.8699	-3.45	-3.42
623.2647	-1.24	-1.32	681.0266	-1.09	-1.14	726.0995	-3.72	-3.69
624.6652	-3.38	-3.37	682.0373	-1.27	-1.32	726.8562	-3.03	-3.05
625.2563	-1.75	-1.74	682.4845	-2.32	-2.35	728.4838	-1.78	-1.77
626.5139	-2.62	-2.59	683.3236	-2.12	-2.19	730.6570	-1.69	-1.76
627.0232	-2.68	-2.69	683.7010	-1.86	-1.90	731.2057	-2.05	-2.06
629.0548	-4.51	-1.49	683.9834	-3.48	-3.52	740.0864	-4.60	-4.60
630.3466	-2.74	-2.80	684.3660	-0.93	-0.96	740.1689	-1.73	-1.71
631.1505	-3.26	-3.26	685.1643	-5.46	-5.47	741.1162	-0.44	-0.39
631.5816	-1.78	-1.77	685.5720	-1.86	-1.92	741.8327	-3.13	-3.13
632.2693	-2.41	-2.42	685.7252	-2.22	-2.26	741.8673	-1.56	-1.59
633.0852	-1.33	-1.33	685.8154	-1.04	-1.11	742.1562	-1.90	-1.90
633.5336	-2.33	-2.24	686.0102	-2.52	-2.57	743.0543	-4.00	-3.96
635.3837	-6.63	-6.66	686.1942	-3.91	-3.94	744.7400	-1.18	-1.21
637.6192	-3.13	-3.28	686.2499	-1.56	-1.60	746.1526	-3.62	-3.61
638.0747	-1.43	-1.44	686.4314	-2.42	-2.47	746.3392	-1.83	-1.87
638.5722	-1.97	-2.03	688.0633	-2.45	-2.47	748.1744	-4.33	-4.31
639.2543	-4.10	-4.08	689.8294	-2.29	-2.32	748.4305	-1.81	-1.84
639.3610	-1.61	-1.68	691.6689	-1.45	-1.48	749.1655	-1.09	-1.13
641.1108	-2.45	-2.42	693.6499	-2.36	-2.39	749.8535	-2.30	-2.32
643.6411	-2.54	-2.57	695.1246	-1.17	-1.21	750.1271	-3.06	-3.10
648.1877	-3.03	-3.00	696.0323	-2.10	-2.11	750.7271	-1.11	-1.20
649.8946	-4.76	-4.72	697.0473	-3.93	-4.00	751.5835	-3.60	-3.69
651.8374	-2.68	-2.66	697.1937	-3.57	-3.58	753.1153	-0.63	-0.65
653.3936	-1.39	-1.43	697.8859	-2.59	-2.45	754.0439	-3.93	-3.93
659.1314	-2.17	-2.17	698.8531	-3.59	-3.59	754.7897	-1.32	-1.40
659.3879	-2.36	-2.42	700.0621	-2.33	-2.33	755.1096	-1.75	-1.78
660.8031	-4.09	-4.08	700.7973	-2.00	-2.04	756.8906	-0.93	-0.99
662.5029	-5.41	-5.40	701.0353	-2.07	-2.10	758.2115	-1.81	-1.89
662.7549	-1.64	-1.66	702.2961	-1.18	-1.23	758.3797	-1.97	-1.96
663.3755	-0.88	-0.86	702.4067	-2.14	-2.13	761.7992	-2.51	-2.55
666.7426	-4.51	-4.52	703.8228	-1.21	-1.30	771.9053	-1.17	-1.27
666.7723	-2.24	-2.26	706.9538	-4.44	-4.48	772.3212	-3.63	-3.61
669.9142	-2.25	-2.32	707.1857	-1.56	-1.79	773.7668	-2.94	-3.02
670.3572	-3.12	-3.14	707.2812	-2.94	-2.99	774.5515	-1.35	-1.40
670.4485	-2.77	-2.80	708.3400	-1.48	-1.49	775.1114	-0.87	-0.95
671.0322	-4.97	-4.95	709.0394	-1.13	-1.17	780.7913	-0.59	-0.69
671.3745	-1.56	-1.61	711.4557	-4.10	-4.12	782.0793	-2.78	-2.81
672.5358	-2.34	-2.38	711.8099	-1.72	-1.69	784.4552	-1.88	-1.92
672.6671	-1.15	-1.19	712.4993	-3.82	-3.84	794.1095	-2.59	-2.60
673.3157	-1.56	-1.61	713.0929	-0.75	-0.75	795.4942	-3.92	-3.95
673.6530	-3.23	-3.28	713.2992	-1.80	-1.78	795.5699	-1.33	-1.38
673.9524	-4.99	-5.02	714.2524	-1.09	-1.15	795.9151	-1.39	-1.43
674.5965	-2.84	-2.89						

В ГАО АН УССР разработан метод определения значений сил осцилляторов по данным наблюдений линий поглощения в спектре Солнца [8], т. е. в качестве источника света используется почти идеальный источник — солнечная фотосфера. Этим методом найдены величины  $gf$  для 1614 линий элементов группы железа со средней квадратичной погрешностью 20—25 % [2].

Один из источников ошибок — погрешности в наблюдаемых центральных интенсивностях и эквивалентных ширинах, которые возникают вследствие неуверенного проведения уровня непрерывного спектра. Этот вопрос недавно очень тщательно исследовали Руттен и ван дер

Залм [11], что позволило им, пользуясь льежским атласом спектра Солнца, с высокой точностью вычислить центральные глубины и эквивалентные ширины 750 неблендированных в спектре Солнца линий 29 химических элементов. Мы воспользовались этими результатами и определили силы осцилляторов этих линий. В нашей работе приводятся значения  $gf$  для 358 линий нейтрального (табл. 1) и 22 линий ионизованного железа (табл. 2) со средней квадратичной погрешностью, не

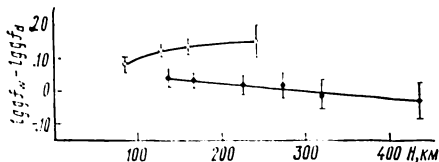
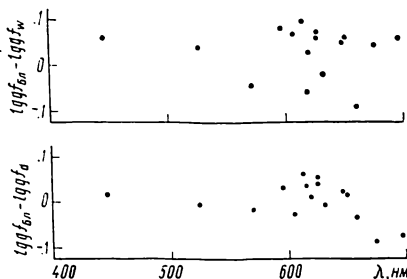


Рис. 2. Сравнение «солнечных» значений сил осцилляторов с данными Блэкуэлла и др. [5]

Рис. 3. Разность значений сил осцилляторов, найденных по эквивалентным ширинам и центральной интенсивностям, в зависимости от глубины образования центра линии поглощения в атмосфере Солнца

превышающей 12 % (для линий FeI). Методика вычислений сил осцилляторов по эквивалентной ширине  $\lg gf(W)$  и центральной глубине  $\lg gf(d)$  подробно изложена в наших предыдущих работах [3, 8]. Использовалась модель атмосферы Солнца Холвегера — Мюллер [9],  $v_{\text{микро}} = 0.9 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $v_{\text{макро}} = 1.75 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\gamma = 1.3 \gamma_{\text{в}}$ ,  $\lg A(\text{Fe}) = 7.64$ .

Сравнение результатов наших вычислений для линий нейтрального железа с данными [7] и [1] представлено на рис. 1. В настоящее время это, по-видимому, наиболее полные списки экспериментальных величин  $gf$ , усредненных по данным многочисленных авторов. Однако даже в них отсутствует около 35 % от общего числа линий, приведенных в табл. 1 данной работы. Из рис. 1 следует, что еще для многих линий значения  $gf$  получены со значительной погрешностью, а для некоторых — она достигает половины порядка и даже более. На рис. 2 наши результаты сравниваются со значениями  $gf$ , полученными Блэкуэллом и др. [5, 6], в настоящее время наиболее точными. Видно, что для каждой из 16 общих линий погрешность величин  $\lg gf$  не превышает 0.1.

Представляет интерес исследовать разности  $\Delta = \lg gf(W) - \lg gf(d)$ , которые на рис. 3 показаны в зависимости от глубины образования центра линии  $H$ . Точки относятся к нейтральному, а кружки к ионизованному железу. Зависимость  $\Delta(H)$  для линий нейтрального железа подробно анализировалась в работе [10], где показано, что она обусловлена эффектами отклонения от ЛТР. Линии ионизованного же-

Таблица 2. Силы осцилляторов линий ионизованного железа

$\lambda$ , нм	$\lg gf(W)$	$\lg gf(d)$	$\lambda$ , нм	$\lg gf(W)$	$\lg gf(d)$	$\lambda$ , нм	$\lg gf(W)$	$\lg gf(d)$
467.0172	-4.25	-4.37	582.4416	-4.73	-4.85	643.2683	-3.75	-3.85
472.0134	-4.69	-4.85	599.1363	-3.68	-3.83	645.6387	-2.23	-2.32
499.3353	-3.81	-3.93	608.4106	-3.97	-4.04	651.6087	-3.39	-3.56
523.4622	-2.22	-2.43	614.9248	-2.81	-2.98	722.2395	-3.46	-3.52
526.4802	-3.11	-3.25	623.9942	-3.67	-3.75	747.9700	-3.82	-3.96
532.5548	-3.28	-3.44	636.9462	-4.27	-4.41	751.5835	-3.60	-3.69
542.5246	-3.32	-3.50	641.6923	-2.79	-2.91	771.1727	-2.68	-2.81
582.3158	-3.09	-3.17						

леза ведут себя по-другому: разность  $\Delta$  с увеличением  $H$  увеличивается, в то время как для линий нейтрального железа она уменьшается. Кроме того, по абсолютной величине значения  $\Delta$  для линий Fe II в несколько раз больше таковых для линий Fe I. Расчеты показали, что особенности поведения линий ионизованного железа не вызваны эффектами отклонения от ЛТР. В настоящее время мы не можем указать конкретную причину такого поведения линий ионизованного железа.

Авторы благодарят Р. Руттена за предоставление значений эквивалентных ширин и центральных глубин линий поглощения в спектре Солнца до их опубликования.

1. *Боярчук А. А., Саванов И. С.* Силы осцилляторов линий нейтрального железа и его содержание в атмосфере Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1985.—70.— С. 27—49.
2. *Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., Орлова Т. В.* Солнечные системы сил осцилляторов элементов группы железа // Кинематика и физика небес. тел.—1985.—1, № 4.— С. 3—8.
3. *Костык Р. И.* Силы осцилляторов линий нейтрального титана // Астрон. журн.—1982.—59, № 4.— С. 693—698.
4. *Biemont E., Grevesse N.*  $f$ -values and abundances of the elements in the Sun and stars // Phys. scr.—1977.—66.— P. 39—47.
5. *Blackwell D. E., Ibbetson P. A., Petford A. D., Shallis M. J.* Precision measurement of relative oscillator strengths. IV // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1979.—186, N 3.— P. 633—650.
6. *Blackwell D. E., Petford A. D., Shallis M. J.* Precision measurement of relative oscillator strengths. VI // Ibid.—1979.—186, N 3.— P. 657—668.
7. *Fuhr J. R., Martin G. A., Wiese W. L., Younger S. M.* Atomic transition probabilities for iron, cobalt, and nickel // Phys. and Chem. Ref. Data.—1981.—10, N 2.— P. 305—565.
8. *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. Ser.—1981.—46.— P. 239—248.
9. *Holweger H., Müller E. A.* The photospheric barium spectrum, solar abundance and collision of Ba II lines by hydrogen // Solar Phys.—1974.—39, N 1.— P. 19—30.
10. *Rutten R. J., Kostik R. I.* Empirical NLTE analyses of solar spectral lines. III // Astron. and Astrophys.—1982.—115, N 1.— P. 104—114.
11. *Rutten R. J., van der Zalm E. B. J.* Revision of solar equivalent widths, Fe I oscillator strengths and the solar abundance // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1984.—55, N 1.— P. 143—161.

Глав. астрон. обсерватория АН УССР,  
Киев

Поступила в редакцию 26.07.85