

元素量計算プログラム WIDTH9 のダンピング

加藤 賢一

概要

Kurucz 作の WIDTH9 に彼の ATLAS9 による太陽モデルを用いて太陽の鉄量を求める場合、ダンピング効果がやや過剰気味であることを示す。このため、弱い線から求めた量と強い線から求めた量に差があるので注意を要する。

1. はじめに

恒星のスペクトル線強度から元素量を求める際、Kurucz(1993)が作成したプログラム WIDTH9 が広く使用されている。同じく彼が作成した大気モデルならびにその計算プログラム ATLAS9 や ATLAS12 などと共にネット上でも公開されているので (<http://kurucz.harvard.edu/>)、そのソース・ファイルを見て計算過程をたどることができる。

恒星のスペクトル線は種々の理由により実験室でのそれより広がっている。自転等の外的要因を除いてもなお広がっているのは実験室とは異なる恒星大気という環境の中で、(1) 熱運動による速度場 (マイクロ乱流速度を含む)、(2) 周囲を取り巻く粒子の影響による速度場、があり、それにより対象としている原子がドップラー効果を受けているからである。この後者の (2) に関係する効果をダンピングと呼んでいて、主にスペクトル線の端にあたる翼部に働いている。一方、(1) に関係する速度場は線中心によく作用する。観測的には、弱い線 (等価幅で 100mÅ 程度以下) では主に (1) によって支配され、それ以上の強い線では (2) のダンピングが効いてきて、翼部が発達することが見てとれる。

ダンピング過程は次の 3 種類に分類されている。放射ダンピング (これは環境とは直接関係はないが)、シュタルク効果、ファンデルワールス効果である。放射ダンピングは放射過程が有限時間内で終了することにより光波が途中で切れてしまうことによる効果で (従って、原子固有の性質であり、フーリエ成分が有限個しか取れないことにつながる)、シュタルク効果は周囲にある電子による効果、ファンデルワールス効果は主として水素原子による静電誘導効果である。

WIDTH9 を動かすためにはこうした効果を決めるダンピング係数を与えてやらなければならない。それが与えられない場合は内蔵されているお仕着せの近似式で決めることになる。実際に WIDTH9 ではどのような物理過程を考慮しているかは Kurucz and Avrett (1981) にあるが、それより Castelli (2005) の方が分かりやすいかも知れない。

2. WIDTH9 のダンピング

WIDTH9 を動かすにはスペクトル線データとして、次のように、イオンの種類 (原子番号+電離)、波長 (Å)、励起ポテンシャル(eV)、gf 値、放射ダンピング係数 (上の例では 7.89)、シュタルク効果係数 (-6.09)、ファンデルワールス効果係数 (-7.78)、等価幅 (mÅ) の順に並べることになっている。3 係数は対数値で与えられている。

26.00	4184.891	2.831-0.869	7.89	-6.09	-7.78	110.0
26.00	4239.361	3.642-1.520	7.69	-4.71	-7.13	60.0

シュタルク効果係数、ファンデルワールス効果係数はそれぞれ γ_s/Ne 、 γ_w/N_H の温度 10000K における値である。ここで γ_s 、 γ_w はシュタルク効果・ダンピング量、ファンデルワールス効果・ダンピング量で、Ne、 N_H は電子数密度、中性水素原子数密度である。

多くの場合、Kurucz 自身がこれらの係数を与えてくれているので (Kurucz & Bell 1995)、實際上、これを求めて苦労することはない。

3. WIDTH9 の出力結果例

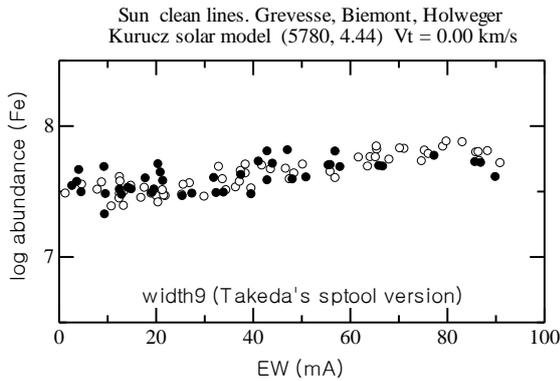
太陽スペクトル上で測定した Fe I/II 線強度 (表参照) から WIDTH9 で Fe 量を求める。太陽大気モデルは Kurucz の大気モデル ATLAS9 で作ったものである (表参照)。

結果を次に示す。

等価幅の小さな弱い線では、マイクロ乱流速度を調整して元素量が等価幅に依存しないようにできるが、等価幅が 200mA を越えるような強い線ではマイクロ乱流速度が効かず、弱い線の示す元素量より相当低く出ている。これは WIDTH9 ではダンピングの効果を大きく考慮していて、強い線の元素量を下げる方向に作用していることを示しているからと解釈できる。

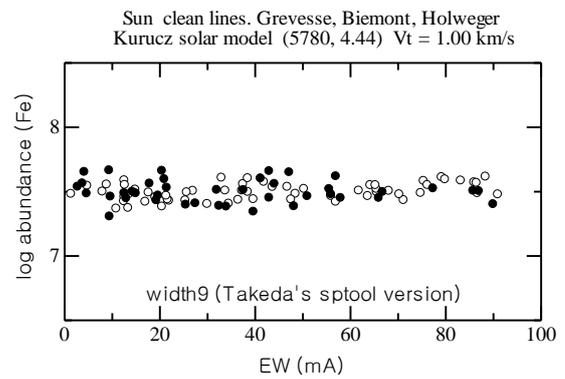
こうした状態では、このまま WIDTH9 を用いて元素量を求めることに不安が残る。

それでは、ダンピングの扱いを微小変更することで弱い線と強い線が示す元素量を合わせることができないだろうか。これがここで追究したいことである



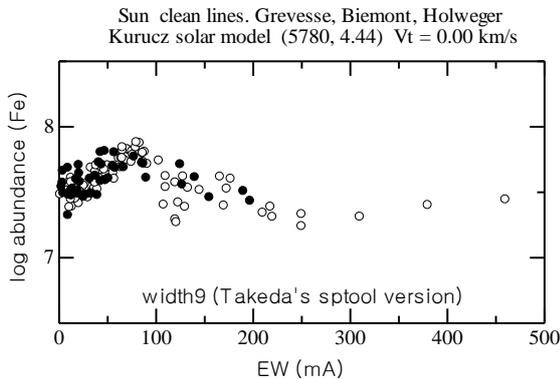
(1-1)マイクロ乱流速度 0.0km/s を仮定。

横軸は等価幅 EW(mA)、縦軸が元素量（水素量を 10^{12} 個とした場合）。等価幅が 10-80mA 当たりまで右上がり傾向を示す。



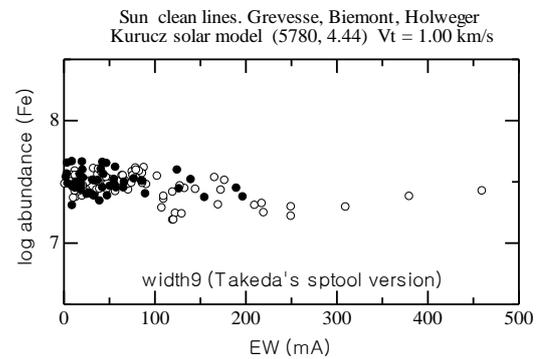
(1-2)マイクロ乱流速度 1.00km/s を仮定。

マイクロ乱流速度の効果により等価幅への依存性がほぼ消えた。従来の多くの結果を追認する内容である。



(1-3)マイクロ乱流速度 0.0km/s を仮定。

強い線まで含めて見た。強い線は弱い線とは振る舞いが異なり、強い線では元素量が低く出ている。



(1-4)マイクロ乱流速度 1.00km/s を仮定。

マイクロ乱流を入れることで弱い線の値が下がり、等価幅への依存性は消えたが、強い線の示す元素量はなお低く、弱い線の系列とは繋がらないように見える。

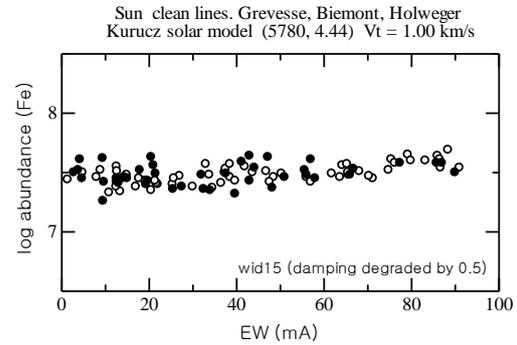
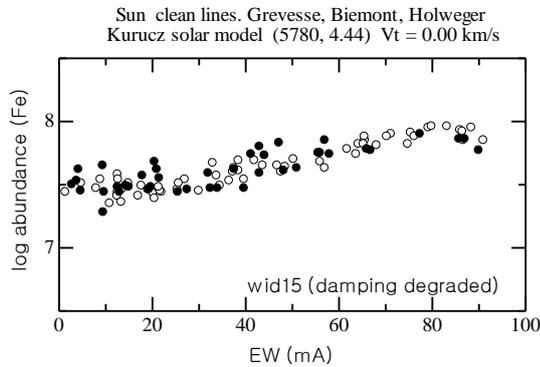
図 1. width9 で求めた太陽大気中の鉄量。黒丸●が Fe I 線、白丸○が Fe II 線から求めた値。
マイクロ乱流速度 0.0km/s および 1.0km/s に設定した場合を示す

4. ダンピング項の微修正 (1) - 半分に減少 wid15_05 版

強い線で元素量が低く出るのはダンピングが効きすぎているからと考えられるので、この効果をもう少し弱くとり、元素量を多くとることで線が強めることを試みる。そこで、まず半減させてみることにした。

最終的に Voigt profile を計算するのに用いるダンピング量を半分にした。理論的根拠を欠いてはいるが、ダンピングが元素量にどの程度効くか見るためである。

結果を下に図示した。確かに強い線の示す元素量は大きく出ている。しかし、弱い線の系列に強い線が繋がることはなく、また、マイクロ乱流速度が 1.0km/s でも 100mA あたりまで等価幅と共に元素量は上昇している。これまで行われた太陽鉄量計算との整合性がとれず、半減させたのでは逆にダンピングが弱すぎる結果となった。

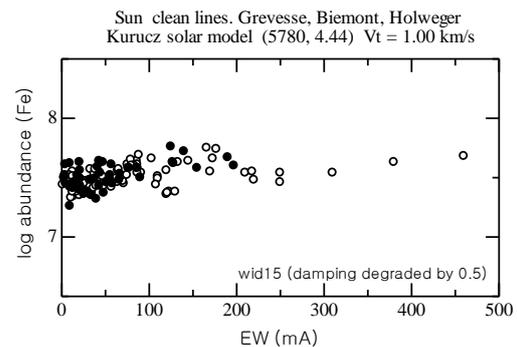
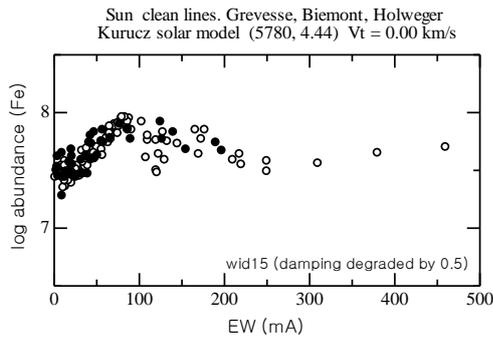


(2-1)マイクロ乱流速度 0.0km/s を仮定。

width9 による上の結果に比べ、ピーク値がやや高くなっている。

(2-2)マイクロ乱流速度 1.00km/s を仮定。

width9 による上の結果に比べ、やや右上がり傾向が見える。



(2-3)マイクロ乱流速度 0.0km/s を仮定。

強い線の元素量が大きく出ている、全体として穏やかな傾向となっているが、マイクロ乱流を入れないと整合性がとれないことには変わらない。

(2-4)マイクロ乱流速度 1.00km/s を仮定。

やや右上がり傾向があり、従来の多くの結果と一致しない。半減させたのではダンピングが弱くなりすぎる。

図 2. width9 のダンピングを半分にしてみた太陽大気中の鉄量。他は図 1 に同じ

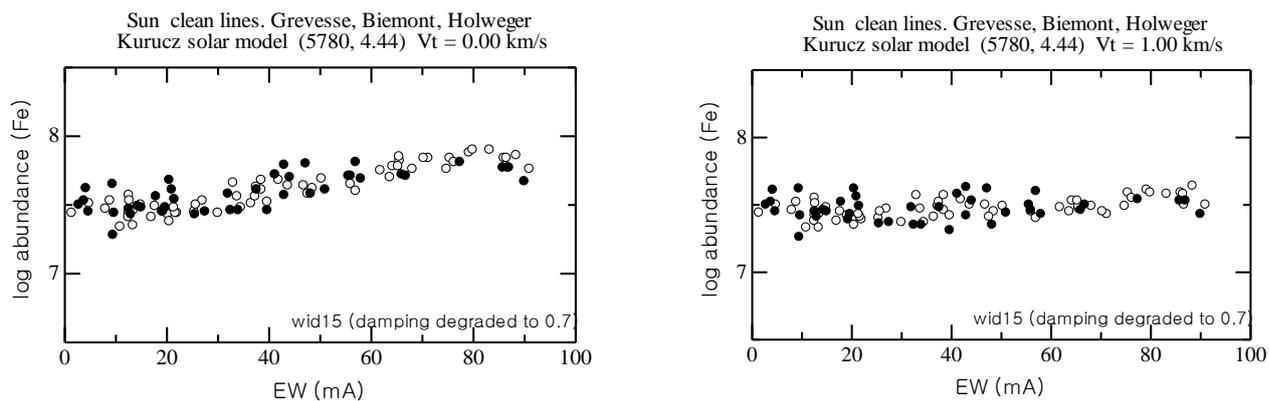
5. ダンピング項の微修正 (2) -0.7 倍に減少 wid15_07 版

上で 0.5 倍では弱くなり過ぎることを見たので、今度は 0.7 倍にしてみることにした。結果は上記二者の結果の中間で、マイクロ乱流速度に 1km/s を仮定した場合、width9 が $100\sim 200\text{mA}$ 線で右下がり傾向を示すのに対し、ほぼフラットで、 200mA あたりまで等価幅への依存傾向は見られなくなった。しかし、それより強い線では系列が異なるように見えることは変わらない。図 3 を参照のこと。

6. 基礎データ

今回用いた線データのうち等価幅が 100mA 以下の弱い線は、Biemont et al (1991)、Holweger et al (1995)、Grevesse & Sauvel (1999) から採用し、等価幅、gf 値などは彼らと与えている値を用いた。 100mA 以上の線については等価幅を Kurucz & Avrett (1981) の太陽スペクトルアトラス上で測定し、他の gf 値やダンピング係数は VALD データベース (Kupka et al 1999) の値を用いた。表 1 のとおりである。

大気モデルは表 2 のとおりである。

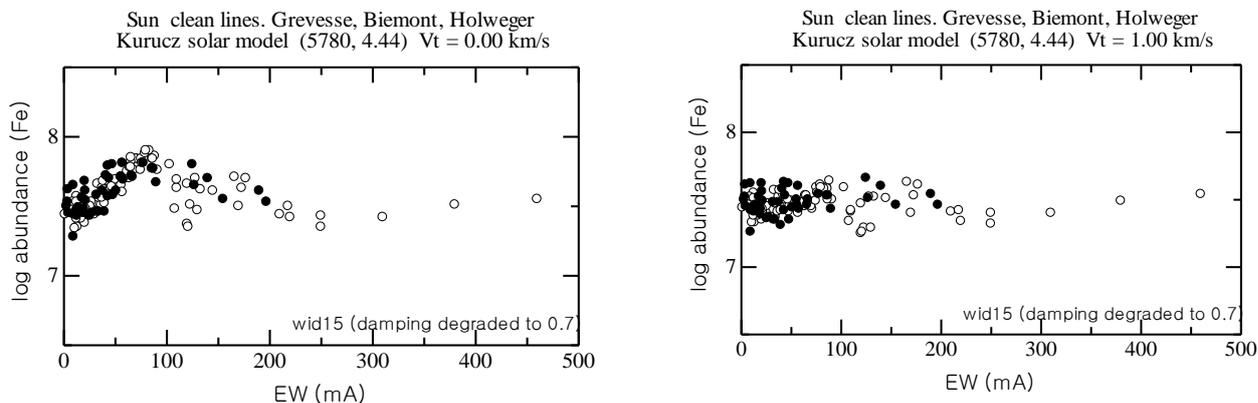


(3-1)マイクロ乱流速度 0.0km/s を仮定。

横軸は等価幅 EW(mA)、縦軸が元素量（水素量を 10^{12} 個とした場合）。等価幅が 10-60mA 当たりまで右上がり傾向を示す。

(3-2)マイクロ乱流速度 1.00km/s を仮定。

このあたりでは等価幅への依存性がほぼ消えた。従来の多くの結果を追認する内容である。



(3-3)マイクロ乱流速度 0.0km/s を仮定。

強い線まで含めて見た。弱い線とは振る舞いが異なる。強い線では元素量が低く出ている。

(3-4)マイクロ乱流速度 1.00km/s を仮定。

マイクロ乱流を入れることで弱い線の値が下がり、等価幅への依存性は消えたが、強い線の系列と連続していない。

図 3. width9 のダンピングを 0.7 倍にして求めた太陽大気中の鉄量。他は図 1 に同じ

7. 考察と結論

以上の数値実験から、ダンピングは等価幅が 70mA 以上で目立って効くようになることが分かった。一方、マイクロ乱流速度は 30mA あたりから影響が顕著になり、100mA 前後でピークを迎え、300mA あたりまでそれが続く。

以上を考慮すると、元素量は 30mA 以下の等価幅の極めて弱い線から求めるのが有利と言える。しかし、そうした弱い線は連続部の引き方や周囲のスペクトル線の影響を受けやすく、またブレンドにも敏感であり、実際上は容易に実行することは困難である。

300mA 以上ではマイクロ乱流速度は元素量決定に影響しないのであるから、それ以上の強い線でも比較的信頼度の高い元素量決定ができることになる。確かに、一面ではそう言えるかも知れないが、ダンピングは恒星大気環境（特に中性水素数密度、電子数密度）が効くものであり、大きな不定性を見込んでおかねばならないし、そもそも強い線の等価幅を適切に得ることは難しい。

最も良く研究されている太陽においても、等価幅に依存しない元素量を求めることは、このように、現状では実現していない。ここでは強い線の示す等価幅 - 元素量関係は弱い線のそれと系列が違って見えるように見えていたが、強い線の振る舞いについては、原子データも含め、まだ不確実なところが多いように思われる。したがって、解析に使用した強い線

の選択にはさらに注意が必要だろうし、Fe II 線にはなお問題が多い。あるいは、ダンピングの取り方は Kurucz が適切なのかも知れない。細かいところでは、このように、なお不確実と言わざるを得ない。また、磁気特異星で明らかになってきたように、元素量が一樣に分布しているとは限らないといったことが一般的に見られるようになれば、等価幅 - 元素量関係にも新たな問題が持ち上がることだろう。

一般に恒星スペクトルから元素量を求めるという古典的な課題に挑む際になおこうした現象があることを想起し、注意する必要があるだろう。これが結論である。

参考文献

- Biemont, E., Baudiux, M., Kurucz, R. L., Ansbacher, W., & Pinnington, E. H., 1991, A&A, 249, 539
 Castelli, F. 2005, Mem. S.A.It. Suppl. Vol. 8, 44
 Grevesse, N., & Sauval, A. J., 1999, A&A 347, 348
 Holweger, H., Kock, M., & Bard, A. 1995, A&A, 296, 233
 Kupka F, Piskunov N E, Ryabchikova, T A, Stemples H C and Weiss W W 1999 A&AS 139 119
 Kurucz, R. L. 1993, ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2km/s Grid, Kurucz CD-ROM No.13 (Cambridge, MA: Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)
 Kurucz, R. L., & Avrett, E. H. 1981, SAO Special Report, 391
 Kurucz, R. L., & Bell, B. 1995, Atomic Line List, Kurucz CD-ROM No. 23 (Cambridge, MA: Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)

表 1. 測定した Fe I/II 線強度

26.00	4187.039	2.449-0.548	8.18	-5.41	-7.25	250.0
26.00	4199.095	3.047 0.155	7.85	-6.12	-7.68	210.0
26.00	4202.029	1.485-0.708	7.99	-6.08	-7.65	460.0
26.00	4235.936	2.425-0.341	8.18	-5.41	-7.26	380.0
26.00	4250.119	2.469-0.405	8.18	-5.41	-7.26	310.0
26.00	4282.403	2.176-0.779	7.48	-6.22	-7.83	170.0
26.00	4375.930	0.000-3.031	4.37	-6.20	-7.80	177.0
26.00	4427.310	0.052-2.924	4.43	-6.20	-7.82	173.0
26.00	5227.188	1.557-1.228	6.74	-6.16	-7.68	250.0
26.00	5397.128	0.915-1.993	7.18	-6.22	-7.76	218.0
26.00	5405.775	0.990-1.844	7.14	-6.22	-7.75	220.0
26.00	4182.383	3.017-1.180	8.07	-5.57	-7.81	87.
26.00	4184.891	2.831-0.869	7.89	-6.09	-7.78	110.0
26.00	4239.361	3.642-1.520	7.69	-4.71	-7.13	60.0
26.00	4377.791	3.274-2.310	7.650	-6.25	-7.75	44.0
26.00	4439.881	2.279-3.002	7.480	-6.22	-7.72	50.0
26.00	4445.471	0.087-5.441	4.220	-6.21	-7.82	40.0
26.00	4478.018	2.198-3.700	6.270	-6.24	-7.82	21.0
26.00	4509.735	4.220-1.293	8.220	-4.34	-7.34	41.0
26.00	4551.647	3.943-2.060	7.980	-5.41	-7.19	28.0
26.00	4585.339	4.608-1.082	8.500	-5.57	-7.44	35.0
26.00	4604.557	4.473-1.063	8.080	-4.69	-7.32	43.0
26.00	4635.846	2.845-2.358	7.990	-5.93	-7.69	56.0
26.00	4637.503	3.283-1.390	7.88	-5.31	-7.17	90.0
26.00	4683.560	2.831-2.319	7.650	-6.17	-7.80	55.0
26.00	4779.439	3.415-2.020	8.000	-6.07	-7.64	42.0
26.00	4787.827	2.998-2.530	7.980	-5.38	-7.22	40.0
26.00	4794.354	2.424-4.050	8.650	-5.89	-7.51	11.0
26.00	4808.148	3.251-2.790	8.200	-5.85	-7.67	28.0
26.00	4967.897	4.191-0.487	8.47	-4.01	-7.52	77.0
26.00	4969.917	4.217-0.710	8.47	-4.72	-7.16	75.0
26.00	5029.618	3.415-2.050	7.510	-6.14	-7.78	50.0
26.00	5049.820	2.279-1.355	8.21	-5.91	-7.59	166.0
26.00	5054.643	3.640-1.921	7.530	-6.10	-7.60	42.0
26.00	5068.766	2.940-1.042	8.18	-5.41	-7.26	120.0
26.00	5083.338	0.958-2.958	7.24	-6.15	-7.74	110.0
26.00	5090.773	4.256-0.400	8.38	-4.50	-7.17	88.0
26.00	5141.739	2.424-1.964	8.20	-5.88	-7.57	82.0
26.00	5194.941	1.557-2.090	6.11	-6.11	-7.68	123.0

26.00	5196.059	4.256-0.493	8.38	-4.57	-7.51	73.0
26.00	5198.711	2.223-2.135	8.23	-6.07	-7.59	103.0
26.00	5217.389	3.211-1.070	8.05	-5.38	-7.22	108.0
26.00	5223.183	3.635-2.35	8.000	-6.07	-7.55	29.0
26.00	5225.526	0.110-4.789	3.22	-6.28	-7.82	72.0
26.00	5242.491	3.634-0.967	7.85	-6.12	-7.58	86.0
26.00	5250.209	0.121-4.938	3.22	-6.28	-7.82	69.0
26.00	5253.462	3.283-1.573	8.04	-5.38	-7.20	75.0
26.00	5364.871	4.445 0.228	8.33	-4.67	-7.14	121.0
26.00	5379.574	3.694-1.514	7.850	-6.12	-7.57	61.0
26.00	5386.333	4.154-1.770	8.45	-4.47	-7.17	32.0
26.00	5389.479	4.415-0.410	8.32	-4.63	-7.16	84.0
26.00	5461.550	4.445-1.900	8.330	-4.63	-7.16	26.0
26.00	5470.093	4.446-1.810	8.330	-4.72	-7.16	27.0
26.00	5473.900	4.154-0.760	8.47	-5.34	-7.27	82.0
26.00	5522.446	4.209-1.550	8.020	-5.57	-7.26	46.0
26.00	5546.506	4.371-1.310	8.310	-5.06	-7.22	50.0
26.00	5560.211	4.434-1.190	8.28	-4.24	-7.19	53.0
26.00	5584.765	3.573-2.320	8.24	-5.75	-7.67	39.0
26.00	5607.664	4.154-2.270	8.610	-4.88	-7.23	15.0
26.00	5619.595	4.386-1.700	8.310	-4.35	-7.23	34.0
26.00	5624.022	4.386-1.480	8.31	-4.70	-7.23	50.0
26.00	5633.946	4.991-0.270	8.88	-5.07	-7.34	63.0
26.00	5651.469	4.473-2.000	8.27	-5.41	-7.19	18.0
26.00	5652.318	4.260-1.950	8.01	-5.57	-7.25	26.0
26.00	5653.865	4.386-1.640	8.31	-3.96	-7.24	38.0
26.00	5704.733	5.033-1.409	8.86	-4.53	-7.30	19.0
26.00	5752.032	4.549-1.177	8.330	-4.69	-7.51	53.0
26.00	5760.344	3.642-2.490	7.89	-6.09	-7.55	23.0
26.00	5775.081	4.220-1.298	8.380	-5.00	-7.53	59.0
26.00	5793.915	4.220-1.700	8.47	-5.29	-7.28	46.0
26.00	5814.807	4.283-1.970	8.470	-5.57	-7.27	22.0
26.00	5827.877	3.283-3.410	8.220	-5.41	-7.26	11.0
26.00	5855.076	4.608-1.478	8.330	-4.54	-7.16	21.0
26.00	5856.088	4.294-1.57	7.990	-5.26	-7.53	34.0
26.00	5859.586	4.549-0.419	8.33	-4.24	-7.51	74.0
26.00	5905.671	4.652-0.730	8.330	-4.76	-7.14	57.0
26.00	5927.789	4.652-1.090	8.320	-6.06	-7.15	42.0
26.00	5929.677	4.548-1.410	8.330	-4.58	-7.20	40.0
26.00	5930.180	4.652-0.230	8.32	-4.71	-7.15	90.0
26.00	5956.694	0.859-4.605	4.000	-6.17	-7.78	50.0
26.00	5984.815	4.733-0.196	8.31	-5.02	-7.42	82.0
26.00	6003.011	3.881-1.120	7.75	-5.38	-7.18	88.0
26.00	6007.960	4.652-0.597	8.330	-4.63	-7.51	64.0
26.00	6008.556	3.884-0.986	7.79	-5.38	-7.54	94.0
26.00	6027.051	4.076-1.089	8.01	-6.03	-7.78	64.0
26.00	6056.005	4.733-0.460	8.32	-4.95	-7.13	75.0
26.00	6065.482	2.608-1.530	8.07	-6.29	-7.58	120.0
26.00	6079.008	4.652-1.120	8.330	-4.50	-7.18	45.0
26.00	6094.373	4.652-1.940	8.330	-4.01	-7.18	20.0
26.00	6105.128	4.548-2.050	8.330	-3.96	-7.24	12.0
26.00	6127.906	4.143-1.399	8.000	-6.02	-7.79	48.0
26.00	6151.617	2.176-3.299	8.290	-6.16	-7.70	51.0
26.00	6165.360	4.143-1.474	8.000	-6.02	-7.78	44.0
26.00	6187.989	3.943-1.720	7.750	-5.38	-7.18	49.0
26.00	6200.313	2.608-2.437	8.08	-6.29	-7.59	76.0
26.00	6213.430	2.223-2.482	8.31	-6.16	-7.69	83.0
26.00	6246.318	3.602-0.733	8.07	-5.38	-7.22	133.0
26.00	6252.555	2.404-1.687	8.02	-6.07	-7.62	128.0
26.00	6265.132	2.176-2.550	8.30	-6.16	-7.70	86.0
26.00	6297.793	2.223-2.740	8.29	-6.16	-7.69	74.0
26.00	6322.685	2.588-2.426	8.07	-6.09	-7.60	76.0
26.00	6335.330	2.198-2.177	8.30	-6.16	-7.70	98.0
26.00	6380.743	4.186-1.376	7.880	-6.03	-7.79	52.0
26.00	6392.538	2.279-4.030	8.310	-6.16	-7.64	18.0
26.00	6393.600	2.433-1.432	8.05	-6.06	-7.62	130.0
26.00	6411.648	3.654-0.595	8.07	-5.38	-7.22	145.0
26.00	6436.406	4.186-2.460	7.480	-6.03	-7.81	10.0
26.00	6593.870	2.433-2.422	8.01	-6.08	-7.63	85.0
26.00	6608.025	2.279-4.030	8.300	-6.16	-7.65	18.0
26.00	6703.566	2.758-3.160	8.080	-6.28	-7.63	37.0
26.00	6710.318	1.485-4.880	7.27	-6.15	-7.73	15.0

26.00	6726.666	4.607	-1.133	8.36	-4.69	-7.52	47.0
26.00	6733.150	4.638	-1.580	8.41	-5.36	-7.25	26.0
26.00	6750.152	2.424	-2.621	6.69	-6.13	-7.61	73.0
26.01	4233.172	2.583	-1.947	8.56	-6.54	-7.88	140.0
26.01	4549.474	2.828	-2.016	8.56	-6.53	-7.88	125.0
26.01	4583.837	2.807	-1.867	8.56	-6.53	-7.88	127.0
26.01	4923.927	2.891	-1.504	8.52	-6.50	-7.88	155.0
26.01	5018.440	2.891	-1.345	8.52	-6.50	-7.89	190.0
26.01	5169.033	2.891	-1.250	8.51	-6.50	-7.89	197.0
26.01	4491.405	2.856	-2.756	8.47	-6.53	-7.88	76.0
26.01	4508.288	2.856	-2.349	8.56	-6.53	-7.87	86.0
26.01	4515.339	2.844	-2.540	8.47	-6.53	-7.88	81.0
26.01	4576.340	2.844	-2.976	8.56	-6.53	-7.88	66.0
26.01	4893.820	2.828	-4.267	8.52	-6.53	-7.89	17.0
26.01	4953.987	5.571	-2.815	8.51	-6.52	-7.89	5.0
26.01	5132.669	2.807	-4.094	8.56	-6.53	-7.89	26.0
26.01	5234.625	3.221	-2.279	8.470	-6.53	-7.88	85.0
26.01	5256.938	2.891	-4.182	8.560	-6.50	-7.89	20.0
26.01	5264.812	3.230	-3.133	8.560	-6.53	-7.88	48.0
26.01	5325.553	3.221	-3.324	8.470	-6.53	-7.88	44.0
26.01	5362.869	3.199	-2.616	8.560	-6.53	-7.88	77.0
26.01	5414.073	3.221	-3.645	8.560	-6.53	-7.88	29.0
26.01	5425.257	3.199	-3.390	8.470	-6.53	-7.89	44.0
26.01	5427.826	6.724	-1.581	8.530	-6.50	-7.89	5.9
26.01	5591.368	3.267	-4.590	8.470	-6.51	-7.88	6.3
26.01	5725.963	3.425	-4.820	8.470	-6.52	-7.88	2.8
26.01	6045.465	6.209	-2.549	8.680	-6.52	-7.87	2.8
26.01	6084.111	3.199	-3.881	8.560	-6.53	-7.89	21.0
26.01	6149.258	3.889	-2.841	8.510	-6.52	-7.87	37.0
26.01	6238.392	3.889	-2.754	8.51	-6.52	-7.87	43.0
26.01	6239.366	2.807	-4.758	8.490	-6.53	-7.91	7.0
26.01	6432.680	2.891	-3.687	8.490	-6.50	-7.90	41.0
26.01	6442.955	5.549	-2.671	8.470	-6.38	-7.77	4.7
26.01	6446.410	6.223	-2.082	8.640	-6.52	-7.87	4.0
26.01	6506.333	5.589	-2.899	8.470	-6.56	-7.76	3.4
26.01	6516.080	2.891	-3.432	8.490	-6.50	-7.90	55.0

表2. Kurucz の太陽大気モデル

```

TEFF 5780. GRAVITY 4.44000 LTE
TITLE (T/G/M)-INTERPOLATED MODEL [BY IPOL.BAT]
OPACITY IFOP 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0
CONVECTION ON 1.25 TURBULENCE OFF 0.00 0.00 0.00 0.00
ABUNDANCE SCALE 1.00000 ABUNDANCE CHANGE 1 0.91100 2 0.08900
ABUNDANCE CHANGE 3 -10.88 4 -10.89 5 -9.44 6 -3.48 7 -3.99 8 -3.11
ABUNDANCE CHANGE 9 -7.48 10 -3.95 11 -5.71 12 -4.46 13 -5.57 14 -4.49
ABUNDANCE CHANGE 15 -6.59 16 -4.83 17 -6.54 18 -5.48 19 -6.82 20 -5.68
ABUNDANCE CHANGE 21 -8.94 22 -7.05 23 -8.04 24 -6.37 25 -6.65 26 -4.37
ABUNDANCE CHANGE 27 -7.12 28 -5.79 29 -7.83 30 -7.44 31 -9.16 32 -8.63
ABUNDANCE CHANGE 33 -9.67 34 -8.69 35 -9.41 36 -8.81 37 -9.44 38 -9.14
ABUNDANCE CHANGE 39 -9.80 40 -9.54 41 -10.62 42 -10.12 43 -20.00 44 -10.20
ABUNDANCE CHANGE 45 -10.92 46 -10.35 47 -11.10 48 -10.18 49 -10.58 50 -10.04
ABUNDANCE CHANGE 51 -11.04 52 -9.80 53 -10.53 54 -9.81 55 -10.92 56 -9.91
ABUNDANCE CHANGE 57 -10.82 58 -10.49 59 -11.33 60 -10.54 61 -20.00 62 -11.04
ABUNDANCE CHANGE 63 -11.53 64 -10.92 65 -11.94 66 -10.94 67 -11.78 68 -11.11
ABUNDANCE CHANGE 69 -12.04 70 -10.96 71 -11.28 72 -11.16 73 -11.91 74 -10.93
ABUNDANCE CHANGE 75 -11.77 76 -10.59 77 -10.69 78 -10.24 79 -11.03 80 -10.95
ABUNDANCE CHANGE 81 -11.14 82 -10.19 83 -11.33 84 -20.00 85 -20.00 86 -20.00
ABUNDANCE CHANGE 87 -20.00 88 -20.00 89 -20.00 90 -11.92 91 -20.00 92 -12.51
ABUNDANCE CHANGE 93 -20.00 94 -20.00 95 -20.00 96 -20.00 97 -20.00 98 -20.00
ABUNDANCE CHANGE 99 -20.00
READ DECK6 71 RHOX, T, P, XNE, ABROSS, ACCRAD, VTURB
4.81269611E-03 4024.7 2.026E+02 3.499E+10 1.672E-03 8.328E-02 2.000E+05
5.99892231E-03 4045.9 2.353E+02 4.034E+10 1.883E-03 8.376E-02 2.000E+05
7.35639862E-03 4067.2 2.726E+02 4.643E+10 2.121E-03 8.452E-02 2.000E+05
8.90476596E-03 4088.9 3.154E+02 5.335E+10 2.386E-03 8.498E-02 2.000E+05
1.06718752E-02 4111.2 3.641E+02 6.121E+10 2.682E-03 8.525E-02 2.000E+05
1.26898495E-02 4133.5 4.196E+02 7.013E+10 3.015E-03 8.581E-02 2.000E+05
1.49913106E-02 4156.0 4.830E+02 8.025E+10 3.390E-03 8.666E-02 2.000E+05
1.76125818E-02 4179.0 5.552E+02 9.174E+10 3.811E-03 8.775E-02 2.000E+05

```

2. 05971420E-02 4202. 4 6. 375E+02 1. 048E+11 4. 280E-03 8. 866E-02 2. 000E+05
2. 39973262E-02 4226. 2 7. 311E+02 1. 195E+11 4. 799E-03 8. 933E-02 2. 000E+05
2. 78678158E-02 4250. 2 8. 377E+02 1. 363E+11 5. 381E-03 9. 012E-02 2. 000E+05
3. 22753884E-02 4274. 5 9. 589E+02 1. 553E+11 6. 030E-03 9. 089E-02 2. 000E+05
3. 72885405E-02 4298. 8 1. 097E+03 1. 767E+11 6. 754E-03 9. 163E-02 2. 000E+05
4. 29907892E-02 4323. 2 1. 254E+03 2. 011E+11 7. 563E-03 9. 269E-02 2. 000E+05
4. 94782251E-02 4347. 6 1. 433E+03 2. 285E+11 8. 471E-03 9. 420E-02 2. 000E+05
5. 68504380E-02 4372. 0 1. 636E+03 2. 596E+11 9. 487E-03 9. 613E-02 2. 000E+05
6. 52259323E-02 4396. 5 1. 867E+03 2. 947E+11 1. 062E-02 9. 825E-02 2. 000E+05
7. 47444602E-02 4421. 3 2. 129E+03 3. 344E+11 1. 188E-02 1. 004E-01 2. 000E+05
8. 55693635E-02 4446. 1 2. 427E+03 3. 793E+11 1. 329E-02 1. 029E-01 2. 000E+05
9. 78796696E-02 4470. 8 2. 766E+03 4. 301E+11 1. 485E-02 1. 058E-01 2. 000E+05
1. 11859873E-01 4495. 8 3. 151E+03 4. 874E+11 1. 660E-02 1. 090E-01 2. 000E+05
1. 27724427E-01 4520. 8 3. 588E+03 5. 522E+11 1. 855E-02 1. 124E-01 2. 000E+05
1. 45770685E-01 4545. 7 4. 085E+03 6. 254E+11 2. 073E-02 1. 164E-01 2. 000E+05
1. 66267127E-01 4570. 8 4. 650E+03 7. 081E+11 2. 317E-02 1. 212E-01 2. 000E+05
1. 89528276E-01 4595. 7 5. 290E+03 8. 013E+11 2. 590E-02 1. 266E-01 2. 000E+05
2. 15949474E-01 4620. 9 6. 018E+03 9. 067E+11 2. 892E-02 1. 325E-01 2. 000E+05
2. 45962135E-01 4646. 2 6. 845E+03 1. 026E+12 3. 229E-02 1. 389E-01 2. 000E+05
2. 80034941E-01 4671. 6 7. 783E+03 1. 160E+12 3. 605E-02 1. 464E-01 2. 000E+05
3. 18726742E-01 4697. 4 8. 849E+03 1. 312E+12 4. 025E-02 1. 549E-01 2. 000E+05
3. 62641363E-01 4723. 9 1. 006E+04 1. 484E+12 4. 493E-02 1. 642E-01 2. 000E+05
4. 12579329E-01 4751. 2 1. 143E+04 1. 679E+12 5. 016E-02 1. 746E-01 2. 000E+05
4. 69292201E-01 4779. 4 1. 299E+04 1. 900E+12 5. 602E-02 1. 866E-01 2. 000E+05
5. 33435578E-01 4809. 0 1. 476E+04 2. 151E+12 6. 258E-02 2. 001E-01 2. 000E+05
6. 06561728E-01 4840. 3 1. 678E+04 2. 437E+12 6. 989E-02 2. 149E-01 2. 000E+05
6. 89610275E-01 4873. 8 1. 906E+04 2. 765E+12 7. 807E-02 2. 314E-01 2. 000E+05
7. 83880522E-01 4909. 8 2. 166E+04 3. 141E+12 8. 723E-02 2. 499E-01 2. 000E+05
8. 90860759E-01 4949. 3 2. 461E+04 3. 573E+12 9. 755E-02 2. 705E-01 2. 000E+05
1. 01232568E+00 4993. 0 2. 795E+04 4. 075E+12 1. 091E-01 2. 937E-01 2. 000E+05
1. 15040335E+00 5041. 7 3. 175E+04 4. 662E+12 1. 222E-01 3. 199E-01 2. 000E+05
1. 30715191E+00 5096. 9 3. 607E+04 5. 353E+12 1. 369E-01 3. 494E-01 2. 000E+05
1. 48484531E+00 5159. 3 4. 096E+04 6. 177E+12 1. 538E-01 3. 829E-01 2. 000E+05
1. 68588604E+00 5230. 7 4. 650E+04 7. 177E+12 1. 732E-01 4. 215E-01 2. 000E+05
1. 91260386E+00 5312. 0 5. 275E+04 8. 413E+12 1. 961E-01 4. 667E-01 2. 000E+05
2. 16677531E+00 5405. 5 5. 975E+04 1. 000E+13 2. 237E-01 5. 218E-01 2. 000E+05
2. 44823251E+00 5514. 2 6. 750E+04 1. 212E+13 2. 593E-01 5. 946E-01 2. 000E+05
2. 75523163E+00 5632. 2 7. 596E+04 1. 499E+13 3. 051E-01 6. 932E-01 2. 000E+05
3. 07980891E+00 5784. 4 8. 490E+04 1. 968E+13 3. 751E-01 8. 474E-01 2. 000E+05
3. 40427414E+00 5986. 2 9. 381E+04 2. 825E+13 4. 950E-01 1. 093E+00 2. 000E+05
3. 70913442E+00 6198. 5 1. 022E+05 4. 162E+13 6. 725E-01 1. 407E+00 2. 000E+05
3. 99238145E+00 6391. 8 1. 100E+05 6. 004E+13 9. 027E-01 1. 728E+00 2. 000E+05
4. 26438408E+00 6562. 3 1. 175E+05 8. 292E+13 1. 176E+00 2. 054E+00 2. 000E+05
4. 52739631E+00 6744. 9 1. 247E+05 1. 158E+14 1. 552E+00 2. 490E+00 2. 000E+05
4. 78059854E+00 6942. 2 1. 317E+05 1. 635E+14 2. 076E+00 3. 082E+00 2. 000E+05
5. 01963550E+00 7163. 6 1. 383E+05 2. 359E+14 2. 844E+00 3. 935E+00 2. 000E+05
5. 23993095E+00 7409. 9 1. 444E+05 3. 460E+14 3. 987E+00 5. 182E+00 2. 000E+05
5. 43905797E+00 7685. 2 1. 499E+05 5. 144E+14 5. 724E+00 6. 909E+00 2. 000E+05
5. 61704634E+00 7994. 8 1. 548E+05 7. 818E+14 8. 498E+00 8. 806E+00 2. 000E+05
5. 77686231E+00 8255. 4 1. 591E+05 1. 086E+15 1. 173E+01 8. 684E+00 2. 000E+05
5. 93371956E+00 8463. 3 1. 635E+05 1. 395E+15 1. 511E+01 8. 161E+00 2. 000E+05
6. 09202262E+00 8660. 7 1. 678E+05 1. 752E+15 1. 911E+01 7. 706E+00 2. 000E+05
6. 25415797E+00 8835. 3 1. 723E+05 2. 127E+15 2. 344E+01 7. 257E+00 2. 000E+05
6. 42315278E+00 9001. 3 1. 769E+05 2. 544E+15 2. 838E+01 6. 883E+00 2. 000E+05
6. 60364383E+00 9163. 1 1. 819E+05 3. 016E+15 3. 407E+01 6. 550E+00 2. 000E+05
6. 79509052E+00 9310. 0 1. 872E+05 3. 507E+15 4. 009E+01 6. 165E+00 2. 000E+05
7. 00140267E+00 9467. 0 1. 929E+05 4. 096E+15 4. 746E+01 5. 943E+00 2. 000E+05
7. 22575316E+00 9605. 0 1. 990E+05 4. 690E+15 5. 485E+01 5. 556E+00 2. 000E+05
7. 46770158E+00 9752. 5 2. 057E+05 5. 393E+15 6. 373E+01 5. 331E+00 2. 000E+05
7. 72907220E+00 9896. 8 2. 129E+05 6. 172E+15 7. 362E+01 5. 216E+00 2. 000E+05
8. 00924458E+00 10028. 2 2. 206E+05 6. 971E+15 8. 372E+01 5. 143E+00 2. 000E+05
8. 29718856E+00 10162. 2 2. 285E+05 7. 894E+15 9. 550E+01 5. 062E+00 2. 000E+05
8. 59547947E+00 10296. 2 2. 368E+05 8. 940E+15 1. 090E+02 4. 982E+00 2. 000E+05

PRADK 1. 4851E+00

BEGIN (INTERPOLATED MODEL)
