

Sirius A と 21Peg のスペクトルを利用した Fe II 高励起線の観測的 gf 値の決定

西村昌能（京都教育大学 非常勤）

1. はじめに

最近、早期B型正常主系列星の高分散高 SN 比スペクトルの解析によって Si II と Al II の高励起線で金属線の弱い輝線（weak metallic lines : WELs）が見つかった（Sadakane & Nishimura(2017) [1]）。この研究では、WELs の強度の表面温度依存性が示され、予想される吸収線と同じ線幅を持ちと線波長シフトが無いことからの輝線成分は恒星大気のすぐ上層に存在し、恒星と共に自転していることが明らかにされた。これらの線は、今までのモデルでは吸収線となるはずのものであった。また、WELs は化学特異星において様々な元素種で存在が確認されている [2]。さらに、B 型星における中性炭素の輝線（WELs）の原因は NLTE 効果であると言われている [3]、[4]。

我々が現在取り組んでいる研究により、早期B型 ($T_{\text{eff}}=17000\text{K}$) の正常星 ι Her において、一回電離した鉄 (Fe II) の高励起線 ($\chi \geq 10\text{eV}$) が WELs になることが見つかった [5]。低励起線ではこのような現象は見られず、輝線でなくても高励起線の一部には吸収線が輝線に埋もれ、等価幅が小さく見積もられる可能性もある。このような観点から早期型星に見られる WELs の振る舞いを知ることは恒星大気の構造の研究と共に化学組成比の研究において、たいへん重要であると確信している。

さて、このような WELs を調べるためには、原子線データ、特に遷移確率=gf 値が重要になってくる。遷移確率 (gf 値) とは、原子核の周りを公転する電子が光子をやりとりしてその軌道の大きさを変化させるときのその軌道での滞在時間 (“寿命” とも言われる) の逆数である。つまり、遷移確率が大きいほど、励起された電子はすぐに元の軌道に戻るため、線の強度は大きくなる。なお、慣例的に線強度は等価幅 (単位 $\text{m}\text{\AA}$) で表される。

2. 現在でも gf 値が正確に求められていないものもある！

gf 値の求め方の求め方には以下の方法がある。

- 1) 測定：地上の実験室でスパークの輝線から求める方法。
- 2) 計算によって求める方法。
- 3) 太陽や恒星の高分散スペクトルの吸収線強度 (等価幅) から求める方法 (solar gf values, stellar gf values)。

これらの方法で求められた gf 値データは原子線データベースに納められている。原子線データベースには、アメリカ度量衡局 (NIST) のものに一定の権威がある [6]。また、VALD3 [7] というヨーロッパの研究者がまとめたデータベースもあり、無批判に研究者が利用している。さらに、R. Kurucz が膨大なデータ量の計算を行い、他のデータを合わせて巨大なデータベースを作っている [8]。これらのデータベースは、web に揚がられていて容易に閲覧、利用することが可能となっている。

さて、研究者が一番信用している NIST のデータベースでは、データの信用度が表示されていて、精度の高い順に A~E の記号で示される。NIST に納められている中性の鉄線 (Fe I) は B、B+ が多く、A もあり、対数値で下 4 桁の表示をされているものもある。一方、一回電離した鉄線 (Fe II) の gf 値は良くても C、多くは D や E であり信用度がかなり低く、有効数字で下 1 桁のものもある！ 特に励起ポテンシャル 10eV 以上の高励起線は NIST のリストに無いものがほとんどである。実は、これらの線は、vald3 や Kurucz リストにあり、出所は Raassen & Uylings (1998) [9] の計算値である。電離した原子の遷移確率は一般に高温で遷移するので、実験値が得られず、不確実な計算値を利用するしか方法がないのである。

3. 恒星のスペクトルから経験的に gf 値を求める方法

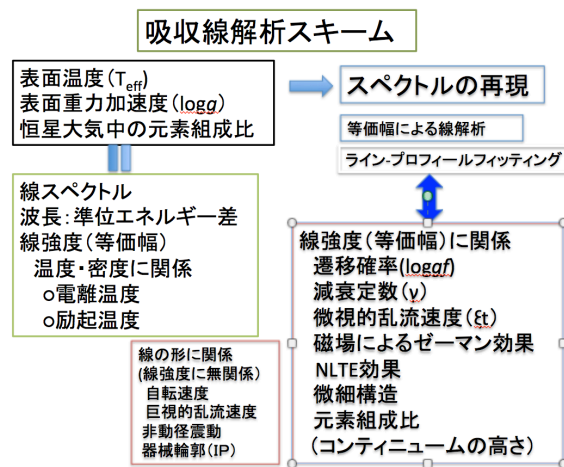


図 1 吸収線解析のスキーム

図 1 は吸収線解析のスキームを表している。この図にあるように一般に恒星のスペクトルは、恒星の表面温度と表面重力加速度、それに大気（光球）の化学組成比が決まれば、一義的に再現される。また、温度や密度で電離度が決まり、さらに遷移する線のエネルギーレベルつまり波長や強度も温度、密度に関係してくる。線の強さを決めるのは、線固有のもので言えば、遷移確率、線幅を広くする減衰係数、恒星大気磁場による線肥大（ゼーマン効果）、局所熱力学的平衡からのズレ（NLTE 効果）、遷移における微細な分裂（微細構造）があり、恒星大気の問題である微視的乱流速度（ ξ_t ：光の平均自由行程より小さなスケールを持つ“泡・渦”の乱流）や特定の元素やイオンのそもそもの組成比や層構造（恒星内部から来る光を吸収する適当な波長の吸収線を持つ元素は恒星大気中で浮上し、そうでないものは沈んでいくことで、元素濃度が光球中の深さで異なるというもの）などがある。このうち、減衰係数は特に強い吸収線でのみ重要であり、ゼーマン効果による線の肥大は磁場が無い/弱い恒星では無視できる。鉄では微細構造の報告は見られず、NLTE 効果は中性鉄にはあるが、一回電離した鉄では報告がない。つまり、これらの中で線強度を決定する一番重要な要因が微視的乱流速度 ξ_t だということになる。つまり、 ξ_t を精密に決定してやれば、化学組成比が正確に求まることになり、他の吸収線を強くする要因を排除すれば、 ξ_t を決定すると吸収

線の強度は線固有の遷移確率だけになるといえる。そこで次の様にして gf 値を求めることにする。

- 1) ξ_{t} を中性鉄も利用して丁寧に決定し NIST データの C より精度の高い gf 値で恒星の鉄組成を求める。
- 2) その ξ_{t} を利用して吸収線一本一本の鉄組成比を決定する。
- 3) 恒星と吸収線ごとの鉄組成の差を解析に用いた gf 値と “正しいはずの gf 値” とのズレと考え、経験的な gf 値を得る。

なお、コンティニュームの高さの要因と隣り合う吸収線の汚染（ブレンド）は無視出来ないことがあることを明記する。

4. 解析手順

スペクトルを利用した恒星は Sirius A と 21 Peg である。Sirius A (A1m V, $T_{\text{eff}}=9938\text{K}$, $\log g=4.31$ Takeda et al. 2010[10]) は全天で一番明るい恒星で分光学的にもよく研究されている化学特異星 (Am星) である。スペクトル上の特徴は鉄をはじめとする金属元素量が多い。特に鉄は太陽値の 0.4dex 多い。強い磁場は観測されていない。B 型星に比べ低温であり鉄の高励起線に輝線成分がある可能性はたいへん低い。また、元素の層構造の報告はない。自転速度は 16.5km/s であり、他の A 型星に比べ自転速度は遅く、隣り合う吸収線の汚染を受けにくいといえる。

Sirius A のスペクトルは McDonald Observatory の Harlan J. Smith 2.7 m 望遠鏡 S4N 分光器で得られたアーカイブデータを利用した。このスペクトルの分解能 R は 60,000、SN 比は 100~数百以上である。

21 Peg (B9.5V, $T_{\text{eff}} = 10400\text{K}$, $\log g = 3.55$) はよく研究された正常星 (太陽に化学組成が近い) の一つである。鉄は太陽値を示す。Sirius A と同程度の低い表面温度である。自転速度が 4km/s とたいへん線が細く、金属量が太陽値であることと合わせて隣り合う吸収線の汚染を受ける可能性がたいへん低いと言える。

利用するスペクトルはマウナケア山上の Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) の 3.6m 望遠鏡 ESPaDOnS 分光器のアーカイブデータで、R=65000, SN 比=数百以上である。

Sirius A の線解析では Sirius A のモデル大気を ATLAS12 (L-ATLAS12 (Lester et al 2008) [11] 加藤賢一さん提供) で構築し、その化学組成比の初期値は最近の研究結果を取り入れ更新した。大気パラメータ ($T_{\text{eff}} = 9938\text{K}$, $\log g = 4.31$) は Takeda et al. 2010[10] を採用した。解析コードは SPTOOL の MPFIT (Takeda 1995[12]) を利用し、MPFIT でラインプロファイル解析を行った。Sirius A のスペクトルで NIST の表にある信用度 C 以上の Fe II の低励起線 (~3eV) と Fe I の吸収線の解析をして、Fe の組成比と ξ_{t} を求め、一番分散の小さい値を Sirius A の Fe 組成と ξ_{t} とする。この ξ_{t} を使って、再度、組成比を求めた。

結果

波長域 4100~6500Å で NIST 基準 C 以上の Fe II 低励起線 (2.8-3.8 eV) 16 本と Fe I 低励

起線 (0.9–4.5 eV) 49 本を用いて鉄の組成比と微視的乱流速度 (ξ_t) を求めた。結果は以下の通りである。

$$\text{Fe II} = 7.87 \pm 0.07, \quad \xi_t = 1.90 \pm 0.07 \text{ km/s} \quad (\text{図 1})$$

$$\text{Fe I} = 7.88 \pm 0.08, \quad \xi_t = 2.00 \pm 0.08 \text{ km/s} \quad (\text{図 2})$$

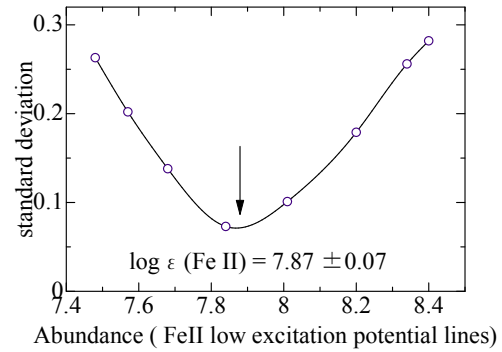
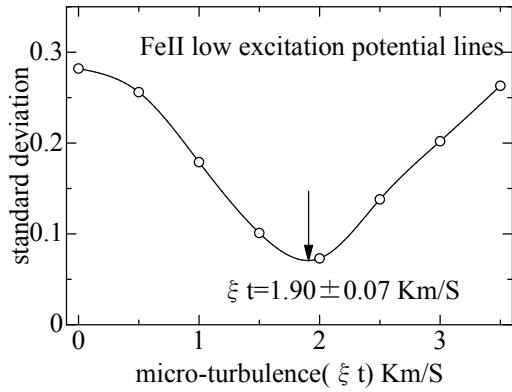


図 1 左 C 以上の Fe II 低励起 (2.8–3.8 eV) で求めた ξ_t (微視的乱流速度)

図 1 右 同じく Fe II で求めた鉄の組成比

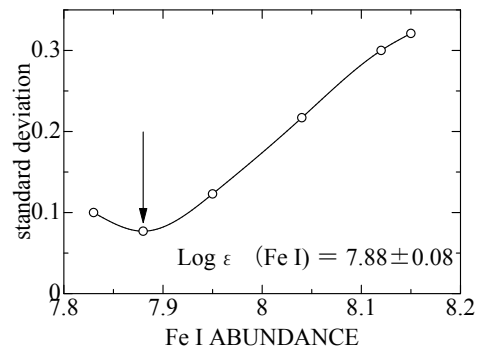
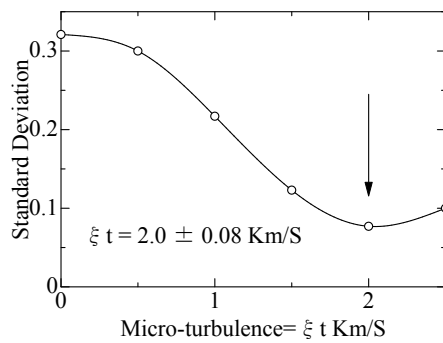


図 2 左 C 以上の 51 本の低励起 Fe I 線で求めた ξ_t (微視的乱流速度)

図 2 右 同じく Fe I で求めた鉄の組成比

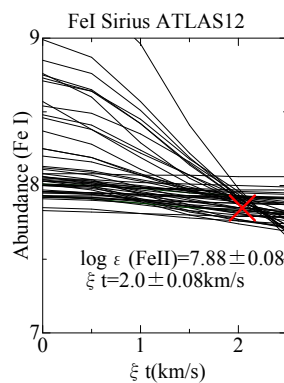
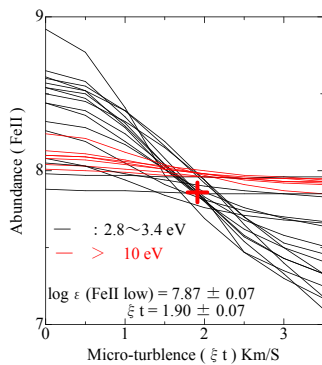


図 3 左 NIST 基準 C 以上の 16 本の Fe II 低励起線と 7 本の高励起線を用いて作成した Blackwell 図

図 3 右 NIST 基準 C 以上の 51 本の Fe I 低励起線 51 本で作成した Blackwell 図

図 3 は、横軸に ξ_t 、縦軸に組成比にした Blackwell 図である。図 3 左では、NIST 基準 C 以上の Fe II 低励起線と高励起線で、図 3 右は Fe I 低励起線で作成したものである。図 1 と図 2 からそれぞれ求めた Fe II 線、Fe I 線の ξ_t と組成比と矛盾はない。

図 3 左には Fe II 高励起線のデータを合わせて描画している。これらの吸収線は弱いもの

が多いが、Fe II 低励起線と比べて系統的に組成比が大きくなる傾向が見られる。つまり gf 値が全体に小さい傾向があるといえる。

我々は Fe I と Fe II の低励起線で求めた鉄の組成比から Sirius A の鉄組成比を 7.88 ± 0.07 (水素の組成比を 12 としたときの対数值) と決定した。得られた Fe II の組成比を検討すると、波長依存性・等価幅依存性・励起ポテンシャル依存性・マルチプレットナンバー (同じ遷移タームごとにまとめたもの) 依存性・光学的深さ依存性にはそれぞればらつきは大きいもののほとんど無いことが分かった。

そこで、この鉄組成比値を用いて、4000~6700Å で 53 本の Fe II 高励起線 (~10 eV) の gf 値を改訂した。

先行研究との比較

先行研究には、Castelli et al. (2009) [13] があり、5000~5400Å の未同定 Fe II 線の gf 値を決定している。また、Castelli & Kurucz (2010) [14] は、同じスペクトルを利用して未同定高励起一回電離鉄線のエネルギーレベルを解析している。彼らが利用した恒星は HR6000 ($T_{\text{eff}}=13450\text{K}$, $\log g=4.3$, $\xi_t=0.0 \text{ km/s}$ 、自転速度 (V_{sini}) = 1.5 km/s の化学特異星で鉄が太陽の 10 倍である) と 46 Aql ($T_{\text{eff}}=12560\text{K}$, $\log g=3.8$, $\xi_t=0.0 \text{ km/s}$, $V_{\text{sini}}=1.0 \text{ km/s}$ の Hg-Mn 星) である。彼らは無批判に両星の微視的乱流速度を 0 km/s としている。

我々が改訂したデータには Castelli et al. (2009) [12] の求めた gf 値と重なるものが 21 本あった。図 4 は、我々の研究の結果と先行研究を比較したものである。図 4 左は我々が求めた gf 値と先行研究の得た値との比較である。図 4 右は我々の値に対して我々の値と先行研究の値の差を我々の値に対してプロットしたものである。

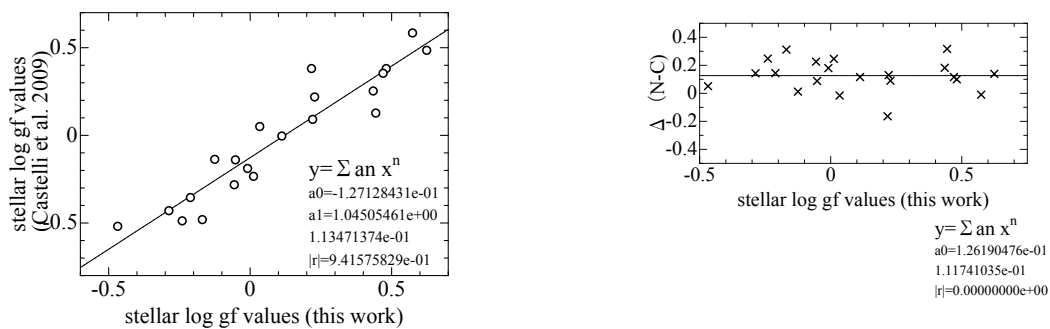


図 4 左 我々が Sirius A で求めた Fe II 起線の gf 値と先行研究の gf 値との比較

図 4 右 我々が求めた gf 値に対して我々の結果と先行研究の差をプロットしたもの

図 4 左からは、我々と先行研究には、ほぼ同じ値を示すものが 7 個あるが、ばらつきがあることがわかる。一時回帰曲線を描いてみると Y 切片が +0.13 であることがわかる。また、図 4 右は我々の結果と先行研究値の差を我々の値に対してプロットしたものであるが、gf 値が +0.13 大きいことが確認できる。

今後の予定

Sirius A で利用した Fe II の低励起線の gf 値を改訂し、21 Peg の低励起 Fe II 線でチェックする計画である。21 Peg は正常星で自転速度も恐ろしく遅く線が細いが、Fe II が弱い（正常星なので）ため、高励起 Fe II 線が見られないのがその理由である。なお、Sirius A については、ESPaDOnS データが入手でき、同じく先行研究で Castelli et al. (2009) [12] が対象星として利用した 46 Aql の ESPaDOnS データも入手出来たので、私たちの結果と彼らの結果を突き合わせることを考えている。

文献

- [1] Sadakane, K. & Nishimura, M. 2017 PASJ 69, 48
- [2] Wahlgren, G.M. & Hubrig, S. 2004, A&A, 418, 1073
- [3] Nieva, M. -F., & Przybilla, N. 2012, A&A, 539, A143
- [4] Alexeeva, S. A., Ryabchikova, T. A., & Mashonkina, L. I. 2016, MNRAS, 462, 1123
- [5] Sadakane, K. & Nishimura, M. 2018 PASJ in press
- [6] Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., & NIST ASD Team 2015, NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.3) (Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology)
- [7] http://vald.astro.univie.ac.at/~vald3/php/vald.php?docpage=about_vald.html
- [8] <http://kurucz.harvard.edu/linelists.html>
- [9] Raassen, A. J. J. & Uylings, P. H. M. 1998 A&A 340, 300
- [10] Takeda, Y., Kambe, E., Sadakane, K., & Masuda, S. 2010, PASJ, 62, 1239
- [11] <http://www.astro.utoronto.ca/~lester/programs.html>
- [12] Takeda, Y. 1995, PASJ, 47, 287
- [13] Castelli, F., Kurucz, R., & Hubrig, S. 2009 A&A 508, 401
- [14] Castelli, F.; Kurucz, R. L. 2010 A&A...520A..57C