

アーカイブデータを用いた

B 型星の近紫外域化学組成比解析

西村昌能

はじめに

B 型星は 1 万 K ~ 2 万数千 K という高温の表面温度を持つ。そのため、1 回電離した金属線のほか 2 回電離したものが優勢になる。ところで 2 回電離した金属イオンの吸収線の遷移確率 (gf 値) には、不確かなものが多いという問題がある。一方、吸収線が弱く (等価幅が小さい)、数も少ないのでブレンドの多い低温度星に比べ、線解析がしやすいともいえる。弱い吸収線が多いと言うことは微視的乱流速度 ξ_t の決定が難しいということでもあるが、裏を返すと ξ_t が効く強い線が無いということなので、それに無頓着でも良いこともある。

しかし、紫外域 ($< 3000\text{\AA}$) では、吸収線は強いが、立て込んでいて解析が難しい。観測データも IUE などに限られている。

さて、宇宙化学組成比は太陽値と太陽系天体から得られた知識を元に決められているが、太陽系から得られた組成比は 46 億年以前の古いものである上、太陽の組成比は種族 I の恒星より組成比が高いともいわれている。太陽や太陽系天体の化学組成比研究は精密に行われているので、太陽を宇宙化学組成比の代表とすることに異存はもちろん無い。一方、早期 B 型星は生まれて間もない恒星で、散光星雲と同様、銀河系の現在の化学組成比を求めるため解析が進められている (Nieva & Przybilla 2012)。

B 型主系列星には、温度系列上に脈動不安定領域が存在し β Cep 型、SPB 型、その両方の特徴を示す Hybrid 型といわれる非動径震動をしめす恒星群が存在する。また化学特異星 (CP 星) も多い。2000 年以降 WELs (弱い金

属輝線) が CP 星に発見されてきたが、Sadakane & Nishimura (2017) によって限定された表面温度の正常星に、1 回電離した金属の、予想ならば吸収線であるべきものが輝線として観測される例が多数見つかった。

CP 星や正常星に見られる WELs は、NLTE 効果で見られるのか、拡散説で生じるのか。それとも別の仮説が立てられるか大きな関心が持たれている。

アーカイブデータ

近年の大型望遠鏡 + エシエル分光器の発展によって高分解能 (~数万、10 万超)、高 S/N 比 (~数百、1000)、広波長域 (3000~10000 \AA) の良質のスペクトルが得られるようになり、さらにこれらのデータが公開されている。そこで今回は B3 型星周辺 ($T_{\text{eff}} \sim 17000\text{K}$, $\log g \sim 4$) の主系列星で自転の投影速度 $v \sin i$ が小さいもの (10 km s^{-1} 程度まで) を選び、研究対象とした。この表面温度はちょうど、WELs の出現下限にあたり、WELs 形成の物理解釈に有用な寄与ができると考えられる。

アーカイブデータの中には波長域が 3000 ~ 10000 \AA をカバーするものがある。この波長域ではバルマー端の両側で線解析が行える。バルマー端を挟んで、連続吸収係数が異なるため、吸収線形成の光学的深さ ($\log \tau$) が異なる領域を調べることができるのである。

WELs の原因を正常星と比較検討できるような研究対象に CP 星を含め、CP 星の構造理解も今回の研究に組み入れた。

差分組成解析

我々は、この研究で差分組成解析を試みた。

もし、大気パラメータ (T_{eff} , $\log g$) がほぼ同じで、同じ波長域で、つまり同じ吸収線ごとに比較でき、解析のシステム (測定者、モデル大気、解析方法など) が同じで、さらに観測装置も同じなら、モデル大気、原子線データ (gf 値、減衰定数など) の不確かさ、測定誤差・機械誤差がキャンセルできるからである。

利用したモデル大気は、ATLAS9 (Kurucz 1993) で LTE の平行大気モデルである。線解析には、国立天文台の竹田洋一氏が作成された吸収線解コード SPTOOL、SPSHOW、MPFIT (Takeda HP) を用いた。MPFIT で、スペクトルフィッティング (スペクトル合成) で化学組成比を決定し、同時に、ATLAS の WIDTH で線解析を行って、吸収線形成領域の光学的深さ ($\log \tau$) を調べるという手順で行った。

利用した/したいアーカイブデータは

- 1) HIDES spectrograph of OAO 188-cm telescope SMOKA から入手
- 2) HDS spectrograph of the Subaru telescope SMOKA から入手
- 3) Elodie spectrograph of the 193-cm telescope at the Observatoire de Haute Provence HP から入手
- 4) UVES spectrograph of the ESO UVESPOP から入手

の 4 種である。

対象とした恒星の特徴

解析は、北天にあり、明るく詳しい研究の進んでいる ι Her を基準星にして 3 Cen A (CP 星)、HD 89587 (未知の B 型星) につなげていくこととした。

発表時点での研究進捗状況は、3 Cen A が波長域 3060~3600Å と 5060~5300Å において吸収線解析と全波長域で輝線探査が終了し、HD 89587 は 3200~3600Å と 5060~5300Å での吸収線解析と全波長域での輝線探査が終了した。 ι Her は、ELODIE を利用して 4000~5300

Å の全元素、また、HIDES を利用して 6000Å 付近の Fe III のみ吸収線解析が終了したところである。

3 Cen A (HR 5210 = HD 120709) は、B5 III-IVp、He weak Peculiar P-Ga subgroup と分類される CP 星である。Vmag = 4.6 と明るい。詳しい研究で $T_{\text{eff}} = 17500$ K、 $\log g = 3.8$ 、 $\xi_t = 0$ km s⁻¹、 $V \sin i = 0$ km s⁻¹ とされている (Castelli et al. 1997)。また、ヘリウムの存在量比の 84% が ³He である (Sargent & Jugaku 1961)。このヘリウム異常は拡散説で説明されている (Vauclair et al. 1974)。また、Mn II、Fe II、Ti II、Hg II などの弱い輝線が多数見えている。この恒星には SN 比は 20 ~ 200 (NUV) 及び 500 (6000Å 付近) の UVES データを利用した。

ι Her (HR 6588 = HD 160762) は B3IV で Hybrid 型と分類される代表的な早期 B 型星である。Vmag = 3.8 で、大気パラメータは $T_{\text{eff}} = 17500$ K、 $\log g = 3.8$ 、 $\xi_t = 1$ km s⁻¹、 $V \sin i = 6$ km s⁻¹ である (Nieva 2013)。HIDES データでは、R~70000、SN 比~数百、ELODIE データでは、R~40000、SN 比 50 ~ 200 である。

HD 89587 (HIP 50519) は、B3III で、Vmag = 6.9 であるが、先行研究はなく大気パラメータは全く知られていない。測光データは U B V J H K のみである。スペクトルデータは UVES を利用した。このデータの SN 比は 100 ~ 500 (NUV)、800~900 (6000Å) である。

HD 89587 の大気パラメータ

我々は以下の様にして HD 89587 の大気パラメータを $T_{\text{eff}} = 17000 \pm 2000$ K $\log g = 4.0 \pm 0.2$ 、 $V \sin i = 10$ km s⁻¹ と決定した。

1) 等価幅の温度依存性

He I 4713Å 線、5016Å 線、5047Å 線の等価幅を UVES データで測定し H γ の等価幅は Balona (1975) から引用した。Lyubimkov et al. (2004) の等価幅と $T_{\text{eff}} \cdot \log g$ を参照し、Nieva (2013)

スケールに変換して等価幅を比較した。その結果、He I の等価幅では $T_{\text{eff}} = 15000\text{K} \pm 1000\text{K}$ を得、He I 5016Å/5047Å の等価幅比から $T(L) = 17700\text{K}$ 、 $T(N) = 18400\text{K}$ 、 $H\gamma$ の等価幅から $T_{\text{eff}} = 20000\text{K}$ 、 $\log g = 3.7$ を得た。

ここで $T(L)$ 、 $T(N)$ はそれぞれ Lyubimkov et al. (2004)、Nieva (2013) から得た表面温度を表す。

2) Q インデックス

また、UBV を利用して星間吸収を除外する大気パラメータ 指標があり、これを Q インデックスと呼んでいる。

$$Q = (U-B) - 0.72 (B-V)$$

Lyubimkov et al. (2004) と Nieva (2013) のシステムで Q インデックスから得られる情報は異なり、 $T(L) = 14800\text{K}$ となる。これを Nieva システムに換算して 15100K を得た。Nieva (2013) からは、 $T(N) = 18800\text{K}$ 、 $\log g = 4.05$ をそれぞれ得た。

3) バルマーラインの輪郭と SPSHOW で予言されるものとの比較

$H\delta$ では $T_{\text{eff}} = 17000\text{K}$ 、 $\log g = 3.9$ 、 $H\gamma$ では、 $T_{\text{eff}} = 16000\text{K} \sim 17000\text{K}$ 、 $\log g = 4.0$ 、 $H\beta$ では、 $T_{\text{eff}} = 17000\text{K}$ 、 $\log g = 4.0$ が得られた。

4) S II (5664.8Å) / N II (5666.6Å) 吸収線等価幅比から $T_{\text{eff}} = 17000\text{K}$ が得られた(定金晃三、私信)。

5) $V \sin i$ は、MPFIT の解析で得た。

それぞれの値の正確さを加味して HD 89587 の大気パラメータとした。

差分化学組成比解析の結果

まず、正常星である ι Her と正体不明の HD 89587、3 Cen A で 1 回電離した鉄 (Fe II) と 2 回電離した鉄 (Fe III) の存在量比を調べてみた(表 1、() 内は測定した吸収線の本数である)。

表 1 解析で得られた対象星の鉄の組成比

	3 Cen A	ι Her	HD 89587
大気値	17500K, 3.8	17500K, 3.8	17000K, 4.0
Fe II	8.08 ± 0.24 (108)	7.21 ± 0.30 (3)	7.11 ± 0.22 (38)
Fe III	7.77 ± 0.21 (56)	7.35 ± 0.18 (19)	7.34 ± 0.22 (19)

ところで、3 Cen A と ι Her を差分解析すると $4000 \sim 5300\text{Å}$ の可視域で

$$\Delta \log \epsilon (3 \text{ Cen A} - \iota \text{ Her})$$

$$\Delta \text{Fe II} = +0.86 \pm 0.39 \quad (3)$$

$$\Delta \text{Fe III} = +0.38 \pm 0.24 \quad (19)$$

また、 $3300 \sim 5300\text{Å}$ で HD 89587 では

$$\Delta \log \epsilon (3 \text{ Cen A} - \text{HD 89587})$$

$$\Delta \text{Fe II} = +1.00 \pm 0.17 \quad (12)$$

$$\Delta \text{Fe III} = +0.48 \pm 0.25 \quad (19)$$

という結果が得られ、3 Cen A が両星に比べ鉄が過剰であることと、Fe II と Fe III の組成比に大きな食い違いがあるがわかった。3 Cen A での Fe II と Fe III の組成比の矛盾は先行研究にはない知見である。

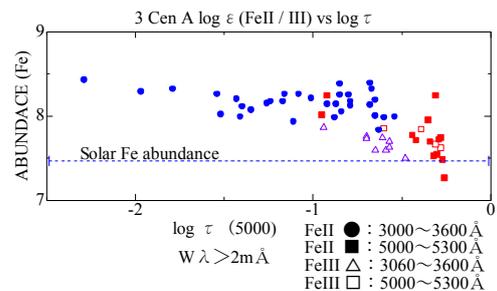


図 1 3 Cen A の光学的深さ ($\log \tau (5000 \text{Å})$) に対する元素組成比 (abundance) 関係等価幅 2.0mÅ 以上の吸収線を用いてイオン別、波長別に区分している。

そこで、この現象を調べるために 3 Cen A において Fe II/III で近紫外域、可視域とも $\log \tau (5000\text{Å})$ と組成比の関係を調べてみた(図 1)。 $\log \tau (5000\text{Å})$ は、波長 5000Å に準拠した光学的深さを表す。 $\log \tau$ が 0 の時に

光球の底で吸収線が形成される事になる。さらに、等価幅とアバダンスとの関係を調べた (図 2)。

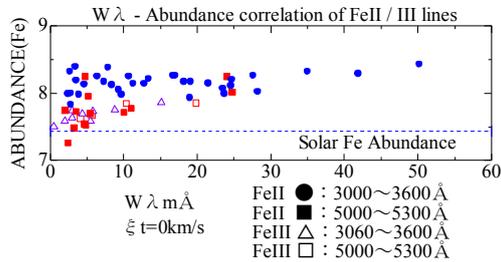


図 2 等価幅と元素組成比の関係

記号は図 3 と同じ

3 Cen A に見られる Fe II / Fe III 組成比矛盾の原因として以下にいくつかあげよう。

- 1) モデルでの ξ_t がもう少し大きいかもしれない。しかし、 $\xi_t = 0 \text{ km s}^{-1}$ を $1\sim 2 \text{ km s}^{-1}$ にしても間に合わないほどの差である。
- 2) モデル大気が電離平衡になっていない。これは検討の余地が有る。 $T_{\text{eff}} = 1000\sim 1500 \text{ K}$ 高いモデルがある。
- 3) NLTE 効果については、Si II/Si III ではあまり効かない。また Fe II、Fe III の研究はない。
- 4) 電離度の異なる原子間に原子データ (特に $\log gf$) の系統的な誤差の存在。
- 5) 輻射圧で Fe が大気上層に濃集の可能性 (元素の層構造) つまり、拡散説の可能性は高い。

図 2 を見ると Fe III と可視域の Fe II を中心に大気の深い所では太陽値に近い値で、大気上層では太陽値の 10 倍程度の Fe 濃度になっている。一方、図 2 から Fe III には強いライン (浅い層で形成) が無いことが、イオンごとの元素組成比の違いとなったといえるだろう。

化学組成比

図 3 と図 4 からは 3 Cen A が正常星、太陽値と化学組成比が大きくずれていることを示している。特に図 4 では、3 Cen A に原子番

号の偶奇効果が破れ、奇数番号の元素量が多いことがわかる。さらに偶数番号の元素の中では鉄が異常に多いことが示された。

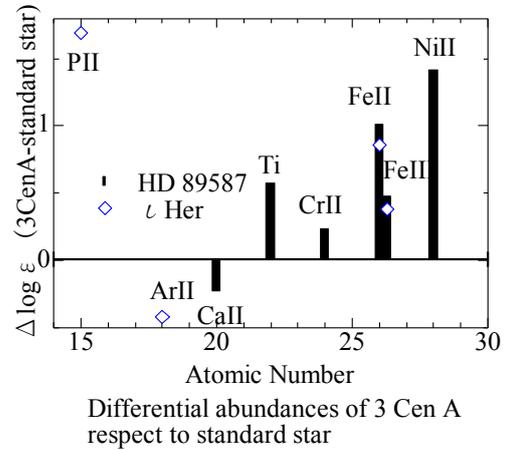


図 3 正常星を準拠した 3 Cen A の化学組成比
◇は ι Her に、棒は HD 89587 に準拠した時の 3 Cen A の化学組成比

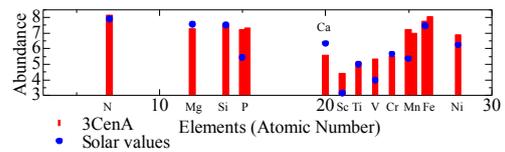


図 4 3 Cen A の元素組成比

棒が 3 Cen A、■が太陽値を表す。NUV・Visible での約 500 本の吸収線解析の結果

文献

Balona 1975 MmRAS 78, 51
 Castelli et al. 1997 A&A 321, 254
 Kurucz, R. L. 1993, Kurucz CD-ROM No. 13, Atlas9
 Stellar Atmosphere Programs and 2 Grid
 Lyubimkov et al. 2004 MNRAS 351, 745
 Nieva 2013 A&A 550, A26
 Nieva, M.-F., Przybilla, N. 2012 A&A 539, A143
 Sadakane, K., Nishimura M. PASJ 2017 69, 48
 Sargent & Jugaku 1961 ApJ 134, 777
 Takeda
<http://optik2.mtk.nao.ac.jp/~takeda/sptool/>
 Vauclair et al. 1974 A&A 31, 381