

## Detailed lithium abundance analyses in metal-poor stars

松野 允郁 (総合研究大学院大学修士一年 / 国立天文台)

### Abstract

金属欠乏星の化学組成には初期の宇宙での化学進化の情報が残されているとして、金属欠乏星の組成の測定やその起源の研究が盛んになされている。金属欠乏星 ( $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -2$ ) では Li の含有量は一定値 (Spite plateau 値) をとるが、より金属量の少ない星 ( $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -4$ ) ではそれよりも低い値をとる (Sbordone et al. 2010)。また、現在までに見つかっている  $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -4$  の恒星のほとんどは鉄より重い元素には過剰を示さずに炭素に過剰を示す CEMP-no 星である。超金属欠乏星の Li の含有量から正しく化学進化の情報を得るためには、低い Li の含有量は  $[\text{Fe}/\text{H}]$  が低いことに起因するものなのか恒星が CEMP-no 星であることに起因するものなのかを切り分けていく必要がある。我々は  $[\text{Fe}/\text{H}] > -4$  の CEMP-no 星の Li の含有量の調査を行うことでこの問題に取り組む。

解析の対象とした恒星は LAMOST の中分散多天体分光器を用いた探査で選び出され、すばる望遠鏡の高分散分光器によって詳細な追観測がなされている (Li et al. 2015)。解析は以下の手順で行った。まずパルマー線の輪郭から有効温度や表面重力を決定し、それらが鉄の電離状態や励起状態と矛盾がないことを確かめ、恒星が主系列星であることを確認した。次に過去に詳細な解析がなされていて性質が似ていると考えられる恒星に対し同様の解析を行い、先行研究と得られた値に矛盾がないことを確かめた。最後に 6708 Å 付近の Li の吸収線に対してスペクトル合成を行い、Li の含有量を求めた。その結果、今回解析を行った CEMP-no 星 ( $[\text{Fe}/\text{H}] = -3.1$ ) の Li 組成は Spite plateau にのる値となり、今回解析を行った恒星の歴史の中で著しく Li の破壊を引き起こす過程は起こっていないと考えられる結果を得た。この結果は  $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -4$  の恒星に見られる低い Li 組成は CEMP-no 星であることに起因するものではなく、Fe 組成に関連するものであることを示唆する。

## 1 Introduction

金属欠乏星は宇宙初期の元素合成が進んでいない時代に形成された。恒星は多くの場合形成当時の化学組成を保存しているので、金属欠乏星の場合には化学組成を調べることによって宇宙初期の元素合成や化学進化の情報を得られるということになる。また、金属欠乏星の多くは銀河ハローに存在している。銀河ハローでは恒星の数が少ないうえ、恒星同士の相対速度が大きいいため、恒星同士が重力を通じてエネルギーを交換することはまれである。したがって金属欠乏星は力学的な情報も形成当時から保存していると考えられ、銀河の力学的な進化を追うのにもきわめて適している。

以上のような理由から金属欠乏星の研究は古くから盛んに行われてきた。HK survey (Beers et al. 1992) や Hamburg/ESO survey (Christlieb et al. 2008)

に続き現在でも、SEGUE/SDSS, LAMOST survey (Deng et al. 2012) など低分散/中分散分光器を用いたサーベイ観測で金属欠乏星候補天体の選出が盛んに行われている。これらのサーベイで選出された候補天体は HDS/Subaru, MIKE/Magellan, UVES/VLT などの高分散分光器を用いて詳細な化学組成の解析がなされ、ビッグバンから現在にいたるまでの元素合成モデルや銀河の進化モデル、恒星進化モデルなどの議論に役立てられている (see Frebel & Norris 2015)。

今回、私たちは  ${}^7\text{Li}$  に注目して解析を行った。標準ビッグバン元素合成理論によれば  ${}^7\text{Li}$  はビッグバンで合成される数少ない元素のうちの一つである (e.g. Coc et al. 2014)。したがって恒星による元素合成が進んでいない時代に形成された金属欠乏星では Li の含有量はビッグバン元素合成理論によってのみ決まり、恒星

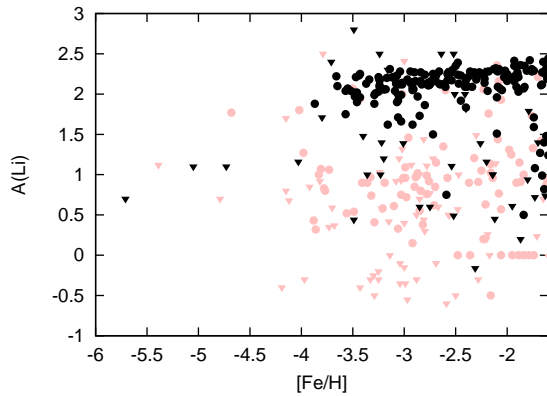


図 1: 観測される Li 含有量。黒が主系列星のデータを表し、ピンクが赤色巨星のデータを表す。(SAGA database(Jul.14,2015), Bonifacio et al. (2015), Sbordone et al. (2010), Caffau et al. (2012), Hansen et al. (2015), Li et al. (2015))

によらず一定値となることが予想される。実際に観測結果を示した図 1 を見ると金属欠乏星 ( $[Fe/H] \lesssim -2$ ) における Li の含有量はほぼ一定値 ( $A(Li) \simeq 2.2$ ) をとる。この plateau は Spite & Spite (1982) によって初めて指摘され、Spite plateau と呼ばれている。しかしながら、観測と理論の進歩によって次のような 2 つの問題が明らかになってきた。i) Planck の観測等で得た宇宙論パラメータ (Planck Collaboration et al. 2014) に基づいた元素合成理論によれば予想される Li の含有量は  $A(Li) \simeq 2.697^{+0.031}_{-0.038}$  であり (Coc et al. 2014)、Spite plateau と 3 倍の違いが生じている。なお、Coc et al. (2014) の結果は D や He などの組成の観測結果をよく再現している。ii) 超金属欠乏星 ( $[Fe/H] \lesssim -3.5$ ) では Spite plateau に乗る恒星の数が減り、金属量のより少ない星を見ていくにつれ、Li の含有量はばらつきを生じながら低下していく。今回私たちは 2 つ目の問題に注目した。

なお、Li は非常に破壊されやすく、 $T \sim 2.5 \times 10^6$  K 程度で容易に破壊される。恒星の表面でこの温度に到達することは無いが、赤色巨星での対流によって恒星表面の Li が温度の高い恒星内部まで輸送されると、恒星表面に存在する Li の量は大きく減少する。図 1 に示したように金属欠乏星でも赤色巨星では Li の含有量が大きく減少している。したがって主系列

星段階の恒星を観測しなければ恒星が形成された当時の Li の含有量を調べることはできない。

金属欠乏星の多くは炭素過剰天体 (CEMP 星) である (see, e.g., Hansen et al. 2015)。CEMP 星は中性子捕獲元素の量に応じて s-process 元素が過剰な CEMP-s 星や CEMP-no 星などの sub-class に分類される。超金属欠乏星 ( $[Fe/H] \lesssim -4$ ) のほとんどは炭素が過剰で中性子捕獲元素には過剰を示さない CEMP-no 星であることがわかっている。すなわち、Spite plateau が崩れる金属量では多くの恒星が CEMP-no 星に分類されている。それゆえ、Spite plateau が崩れる原因が i) これらの恒星が超金属欠乏星であることによるものなのか、ii) CEMP-no 星であることによるものなのかを切り分けることは困難である。私たちは  $[Fe/H] = -3.15$  の主系列段階の CEMP-no 星の観測及び Li の含有量の解析を行いこの問題に取り組んだ。

なお、すでに Sbordone et al. (2010) などで行われているように Li の含有量は採用する恒星大気のパラメータに依存する。今回の私たちの研究でも注意深く Li の含有量の不確かさの由来を確かめながら解析を行った。恒星大気のパラメータの決定には細心の注意を払い、先行研究と比較し妥当性を確認しながら解析を進めた。これらの手順の一部についても紹介していく。

## 2 Observations

観測のターゲットとした恒星 LAMOST J1410-0555 は LAMOST で金属欠乏星の候補天体として選出され、すばる望遠鏡の HDS で観測がなされた天体である。また、比較のため、ほぼ同じ温度と金属量を持つ LAMOST J1305+2815 についても解析を行った。いずれも Li の吸収線  $\lambda = 6708 \text{ \AA}$  付近では  $S/N \sim 150$  で、 $R \sim 36000$  である。以降の解析は HDS で取得したデータに基づく。

以上 2 つの恒星に加え、今回行った解析手法の妥当性を確かめるため、過去に解析がなされた恒星 G64-12 (Aoki et al. 2009) についても同様の解析を行った。G64-12 の詳細な解析結果は Aoki et al. (2009) を参照。

### 3 Methods

解析は局所熱平衡 (LTE) を仮定した 1 次元の恒星大気モデルに基づいて行う。ATLAS9 ODFNEW モデル大気 (Castelli & Kurucz 2004) を内挿することで指定したパラメータをもつ恒星大気モデルを作成する。

#### 3.1 Stellar parameter determination

Balmer 線の吸収線の輪郭は温度や表面重力に依存する (e.g. Barklem et al. 2002)。今回は Balmer 線のうち、温度に対する依存性が大きく他の吸収線とのブレンドが少ない  $H\beta$  線の輪郭に対してフィットを行い有効温度を決定した。表面重力はバルマー線の中でも比較的表面重力に敏感な  $H\alpha$  線の輪郭をフィットすることで決定した。次にこれらの手法で求められた恒星大気のパラメータが鉄の電離状態や励起状態と矛盾がないことを確かめた。ミクロ乱流の大きさは Fe I の成長曲線を再現するように要請することで定めた。

#### 3.2 Abundance analysis

炭素とリチウム以外の元素の含有量の測定は、それぞれの吸収線をガウシアンでフィッティングすることで得た等価幅を用いて求める。複数の吸収線を持つ元素については各吸収線ごとに求めた含有量について平均をとり、不確かさはその分散の大きさ程度と考えた。典型的には不確かさは  $\pm 0.1$  dex 程度である。

炭素の含有量は CH 分子による G バンドの吸収線をフィットすることで決定する。Masseron et al. (2014) のラインリストを参照しスペクトル合成を行い観測データと比較し、炭素の含有量を求めた。

Aoki et al. (2007) より CEMP 星の定義として主系列星に対しては  $[C/Fe] > 0.7$  を採用した。CEMP-no 星の基準は Beers & Christlieb (2005) から  $[Ba/Fe] < 0.0$  を採用することとした。

Li の基底状態には接近したエネルギーを持つ励起状態が 2 つ存在する。今回はこれらの励起状態と基底状態の間の遷移に対応する吸収線から Li の含有量

の測定を行うので、スペクトル合成を必要とする。Smith et al. (1998) のラインリストを参照してスペクトル合成を行い、6708 Å 付近で観測データとの比較を行った。

太陽組成としては Asplund et al. (2009) を参照した。

## 4 Results

### 4.1 Stellar parameters

表 1 に求めた恒星大気のパラメータを示す。G64-12 の解析結果は先行研究とよく一致していて今回の解析の妥当性を示している。J1410-0555 は Y<sup>2</sup> isochrone (Kim et al. 2002) と比較し、主系列星であることがわかった。また炭素と中性子捕獲元素の組成から J1410-0555 は CEMP-no 星と分類される。

### 4.2 Li abundance

表 1 に  $A(\text{Li})$  の値も示した。再び G64-12 の先行研究の解析結果を再現することに成功した。不確かさには温度の不確かさ  $\Delta T = 150$  K に由来する  $\Delta A(\text{Li}) = 0.10$  とフィッティングのエラーに基づく  $\Delta A(\text{Li}) = 0.15$  の部分が存在する。なお、 $\log g$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$ ,  $v_{\text{mic}}$  を不確かさの範囲で変化させても温度やフィッティングエラーに比べ無視できる程度の影響が生じるのみであった。

今回得られた主系列の CEMP-no 星、LAMOST J1410-0555 の Li の含有量は  $A(\text{Li}) = 2.2$  と Spite plateau にのる値となった。

## 5 Discussion & Conclusion

CEMP-no 星、LAMOST J1410-0555 の観測結果はこの星が他の金属欠乏星と比べ著しく Li を破壊する過程を経験していないことを意味する。すなわち、J1410-0555 の炭素は Li の破壊を伴わずにもたらされなければいけない。この結果を一般化すれば、CEMP-no 星であるからといって必ずしも Li が減少してるとは限らないということになる。超金属欠乏

ID	$T_{eff}$ $\pm 150$ K	$\log g$ $\pm 0.3$ dex	$v_{mic}$ $\pm 0.5$ km/s	[Fe/H] $\pm 0.1$	[C/Fe] $\pm 0.1$	A(Li) $\pm 0.2$	
J1410-0555	6200	4.5	0.9	-3.16	1.26	2.2	主系列/CEMP-no
J1305+2815	6100	4.0	1.5	-2.91	< 1.0	2.1	準巨星
G64-12	6300	4.4	1.3	-3.29	< 0.5	2.2	主系列
G64-12	6270	4.4	1.5	-3.37	—	2.18	主系列
(Aoki et al. 2009)	$\pm 100$ K						

表 1: 恒星大気のパラメータ。G64-12 の解析結果は先行研究とよく一致している。J1410-0555 の中性子捕獲元素の含有量は  $[\text{Sr}/\text{Fe}] = -0.1$ ,  $[\text{Ba}/\text{Fe}] = -0.2$  であった。

星で Li の含有量が低い恒星が多いのはそれらの星が CEMP-no 星であることに起因するものではないということが推測できる。

しかしながら超金属欠乏星の Li 含有量が低下している原因や CEMP-no 星の炭素の起源に関してさらなる考察を深めるためには、明らかに観測データが足りていない。特に  $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -4$  の主系列の CEMP-no 星の詳細な観測が求められる。また、Li の含有量に関して議論をする際には温度の不確かさが重要となってくるので、注意深くまた統一された手法で温度が決定された恒星の Li 含有量のデータが必要とされる。もちろん、まだ一例しか見つかっていない CEMP ではない  $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -4$  の恒星のさらなる発見も待たれる。

## Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

## Reference

- Aoki, W., Barklem, P. S., Beers, T. C., et al. 2009, *ApJ*, 698, 1803
- Aoki, W., Beers, T. C., Christlieb, N., et al. 2007, *ApJ*, 655, 492
- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., & Scott, P. 2009, *ARA&A*, 47, 481
- Barklem, P. S., Stempels, H. C., Allende Prieto, C., et al. 2002, *A&A*, 385, 951
- Beers, T. C., & Christlieb, N. 2005, *ARA&A*, 43, 531
- Beers, T. C., Preston, G. W., & Shectman, S. A. 1992, *AJ*, 103, 1987
- Bonifacio, P., Caffau, E., Spite, M., et al. 2015, *ArXiv e-prints*, arXiv:1504.05963
- Caffau, E., Bonifacio, P., François, P., et al. 2012, *A&A*, 542, A51
- Castelli, F., & Kurucz, R. L. 2004, *ArXiv Astrophysics e-prints*, astro-ph/0405087
- Christlieb, N., Schörck, T., Frebel, A., et al. 2008, *A&A*, 484, 721
- Coc, A., Uzan, J.-P., & Vangioni, E. 2014, *J. Cosmology Astropart. Phys.*, 10, 50
- Deng, L.-C., Newberg, H. J., Liu, C., et al. 2012, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12, 735
- Frebel, A., & Norris, J. E. 2015, *ArXiv e-prints*, arXiv:1501.06921
- Hansen, T., Hansen, C. J., Christlieb, N., et al. 2015, *ArXiv e-prints*, arXiv:1506.00579
- Kim, Y.-C., Demarque, P., Yi, S. K., & Alexander, D. R. 2002, *ApJS*, 143, 499
- Li, H., Aoki, W., Zhao, G., et al. 2015, *ArXiv e-prints*, arXiv:1506.05684
- Masseron, T., Plez, B., Van Eck, S., et al. 2014, *A&A*, 571, A47
- Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., et al. 2014, *A&A*, 571, A16
- Sbordone, L., Bonifacio, P., Caffau, E., et al. 2010, *A&A*, 522, A26
- Smith, V. V., Lambert, D. L., & Nissen, P. E. 1998, *ApJ*, 506, 405
- Spite, F., & Spite, M. 1982, *A&A*, 115, 357