

宇宙初期の軽元素量を再現する Ic 型超新星モデル

中村 航^{1,2}, 井上 進³, 和南城 伸也², 茂山 俊和²

¹ 東京大学大学院理学系研究科 天文学専攻, ² 東京大学大学院理学系研究科 Research Center for the Early Universe, ³ 国立天文台

1 Introduction

現在存在する Li, Be, B (LiBeB) といった軽元素の起源のなかでも、宇宙線による破砕反応は ${}^6\text{Li}$ と ${}^9\text{Be}$ の生成において重要な役割をはたしていると思われる。最近の金属欠乏星の観測から、銀河の化学進化の初期段階においては、C や O からなる宇宙線が H や He に衝突して壊れるという破砕反応 (primary spallation process) が支配的であったのではないかと示唆されている (Duncan et al. 1992)。この C や O からなる宇宙線の加速機構として、Fields et al. (1996, 2002) は Ic 型超新星を考え、合成される軽元素量を見積もった。のちに Nakamura & Shigeyama (2004) が、より現実的な星のモデルと状態方程式を用いて同様の計算を行った。どちらの研究も、星のモデルとして完全に H と He の層を失ったものを考え、爆発によって加速された C/O と星間物質 (H 90%, He 10%) との相互作用による軽元素合成量を見積もった (C, O + H, He LiBeB)。しかし、そのような破砕反応だけが ${}^6\text{Li}$ の生成源ではない。もし星表面に薄い He 層が残っていて、さらに周囲に星風でとばされた He が多量に存在していれば、 $\text{He} + \text{He} \rightarrow {}^6\text{Li}$ という反応がおこるだろう。さらに、Meynet et al. (2005) の回転を考慮した重い金属欠乏星の進化計算によると、低金属でもかなりの量の質量欠損がおき、また表面付近の N 量が増えるということがわかった。この N が超新星爆発によって加速されると、周りの He との破砕反応によって ${}^9\text{Be}$ が生成される。この反応は ${}^9\text{Be}$ を生成するほかの破砕反応と比べて最低限必要なエネルギーが小さく反応断面積のピーク値が大きいため、効果的であると思われる。実際、最近の観測から N と Be がともに多く存在している金属欠乏星がいくつか見つっている。今回我々は、爆発のエネルギーの大きい Ic 型超新星によって加速された He, C, N, O (HeCNO) と He, N からなる星周物質との相互作用を計算し、これらの金属欠乏星における軽元素の観測量を説明できるかを調べた。

2 Summary of observation

一般に ${}^6\text{Li}$ の検出は困難であるが、近年いくつかの観測が報告されている。Asplund et al. (2005) は 24 個の金属欠乏星を観測し、そのうち 9 個で ${}^6\text{Li}$ 量を評価した。その中で最も金属量が低いのが LP 815-43 ($[\text{Fe}/\text{H}] =$

-2.74) である。他にも Aoki et al. (in preparation) によって G 64-12 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -3.17$) における ${}^6\text{Li}$ 量が得られつつある。この 2 つの星に対してはすでに Primas et al. (200a,b) が Be 量を見積もっていて、それぞれ $\log \varepsilon(\text{Be}) = -1.09 \pm 0.20$ (LP 815-43)、 -1.10 ± 0.15 (G 64-12) という値を得ている。これは他の金属欠乏星の観測から予測される値よりかなり大きいものである。また、Israelian et al. (2004) による観測から、この 2 つの星はともに N 量も多いことがわかっている。

3 Calculations and results

Meynet et al. (2005) は回転を考慮にいたった重い金属欠乏星の進化計算を行い、外層で回転による混合の影響で C が増えることを発見した。その結果低い金属量にも関わらず強い質量欠損が見られ、同時に He 層で N が増えることを発見した。もしこの N を含む He 層の一部が爆発時に残っていれば、 $\text{N} + \text{He} \rightarrow {}^9\text{Be}$ の反応によって ${}^9\text{Be}$ が生成されることが期待できる。これをふまえ、我々は H-rich 層と He/N 層の大部分を失った星のモデルを用いた。主系列時の質量が $\sim 40M_{\odot}$ で、爆発直前には星風による質量欠損で $\sim 15M_{\odot}$ になった星 (Nakamura et al. 2001) の爆発を考えた。爆発のエネルギーは、極超新星 SN 1998bw に対応する 3×10^{52} ergs を仮定した。爆発によって加速された $13M_{\odot}$ の HeCNO からなる ejecta は周りの He/N とぶつかり、 $\text{HeCNO} + \text{He, N} \rightarrow \text{LiBeB}$ という反応 (破砕反応+He-He fusion) によって軽元素が生成される。加速された ejecta のエネルギー分布は Nakamura & Shigeyama (2004) の計算結果を用いた。加速された ejecta のエネルギー損失を評価する際、"thick target" 近似を用いた。破砕反応と He-He fusion の反応断面積としては Read & Viola (1984) と Mercer et al. (2001) を用いた。ターゲットとして、多量の ${}^9\text{Be}$ と N に加えて ${}^6\text{Li}$ も観測で受かっている LP 815-43 を選んだ。観測よりこの星に対して $X({}^6\text{Li})/X(\text{O}) \sim 6.88^{+3.08}_{-3.22} \times 10^{-7}$, $X({}^9\text{Be})/X(\text{O}) \sim 1.32^{+0.77}_{-0.49} \times 10^{-8}$ という各質量比が得られる。星表面の He/N 層の質量 $M_{\text{He,N}}$ とその中で N の質量比 X_{N} をパラメータとして、これらの観測量を再現できるかを調べた。その結果、 $M_{\text{He,N}} \sim 0.01 - 0.1M_{\odot}$ でかつ $X_{\text{N}} \sim 0.005 - 0.01$ であるとき $X({}^6\text{Li})/X(\text{O})$ と $X({}^9\text{Be})/X(\text{O})$ のどちらも LP 815-43 の観測とよく一致することがわかった。