

超新星におけるニュートリノ軽元素合成

吉田 敬

国立天文台理論研究部

1. Introduction

重力崩壊型超新星から解放される重力エネルギーはその大部分がニュートリノによって運ばれる．これにより超新星からは数秒間に約 10^{58} 個という大量のニュートリノが放出されることになる．このニュートリノと恒星内部の原子核との反応により新しい元素が生成される．これをニュートリノ元素合成 (ν -process) と言う．Li, Be, B という軽元素は超新星において主にニュートリノ元素合成によって生成される．本研究では ${}^4\text{He}$ と ${}^{12}\text{C}$ について新しく求められたニュートリノ-原子核反応を用いて超新星におけるニュートリノ元素合成を数値的に追ひ, 軽元素の生成量を求める．超新星ニュートリノは星の内部を通過する間にニュートリノ振動によってそのエネルギースペクトルを変えることが知られている．この効果はニュートリノ振動パラメータに依存するが, 振動パラメータのうち質量階層と混合角 θ_{13} についてはまだ決定されていない．そこで本研究では軽元素生成量のニュートリノ振動パラメータ依存性についても調べ, 元素合成の立場から振動パラメータへの制限について議論する [1] ．

2. 超新星元素合成モデル

本研究では SN 1987A に対応する $16.2M_{\odot}$ の presupernova モデルを初期条件として爆発エネルギーが $1 \times 10^{51}\text{erg}$ である球対称の超新星爆発を数値的に求めた．元素合成は 291 核種からなる核反応ネットワークを用いて求めた．超新星ニュートリノのモデルについてはニュートリノが運び去る全エネルギーを $3 \times 10^{53}\text{erg}$, ニュートリノルミノシティを 3 秒の time scale で減少, エネルギースペクトルを化学ポテンシャルが 0 の Fermi 分布と仮定し, ニュートリノ温度を $(T_{\nu_e}, T_{\bar{\nu}_e}, T_{\nu_{\mu,\tau}, \bar{\nu}_{\mu,\tau}}) = (3.2 \text{ MeV}, 5 \text{ MeV}, 6 \text{ MeV})$ と設定した．ニュートリノ振動パラメータには Large mixing angle 解を用い, 質量階層と $\sin^2 2\theta_{13}$ をパラメータとした．

3. 結果

図 1 に軽元素の生成量を示す．超新星においては, 軽元素の中では主に ${}^7\text{Li}$ と ${}^{11}\text{B}$ が $10^{-7}M_{\odot}$ のオーダーで生成される． ${}^7\text{Li}$ の生成に重要なニュートリノ反応は中性カレント反応である ${}^4\text{He}(\nu, \nu'p){}^3\text{H}$ と ${}^4\text{He}(\nu, \nu'n){}^3\text{He}$, ${}^{11}\text{B}$ の生成に重要なニュートリノ反応はこの 2 つの反応と ${}^{12}\text{C}(\nu, \nu'p){}^{11}\text{B}$ と ${}^{12}\text{C}(\nu, \nu'n){}^{11}\text{C}$ である． ${}^4\text{He}$ からのニュートリノ反応から作られた ${}^3\text{H}$ と ${}^3\text{He}$ は α 捕獲反応によりそれぞれ ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$ と ${}^7\text{Be}$ になる．一方, ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$ の生成量は ${}^7\text{Li}$ と ${}^{11}\text{B}$ と比べると数桁少ない．消滅核種である ${}^{10}\text{Be}$ も ${}^9\text{Be}$ よりやや少ない程度作られる．

ニュートリノ振動を考慮すると ${}^7\text{Li}$ と ${}^{11}\text{B}$ の生成量は増加する．これは, ニュートリノ振動によって ν_e と $\bar{\nu}_e$ の平均エネルギーが大きくなり, その結果荷電カレント反応である ${}^4\text{He}(\nu_e, e^-p){}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}(\bar{\nu}_e, e^+n){}^3\text{H}$, ${}^{12}\text{C}(\nu_e, e^-p){}^{11}\text{C}$, ${}^{12}\text{C}(\bar{\nu}_e, e^+n){}^{11}\text{B}$ の反応率

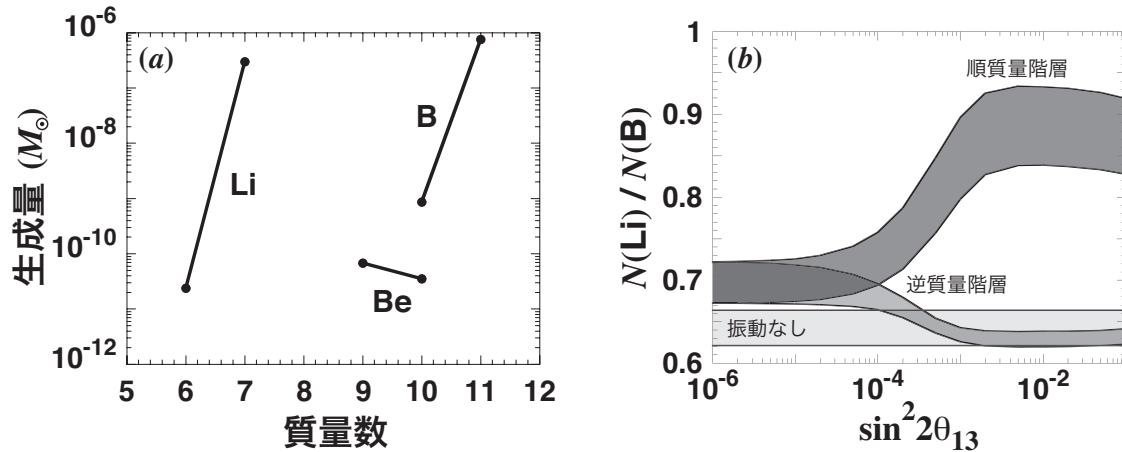


図 1: (a): SN 1987A モデルで生成される軽元素生成量．横軸は質量数，縦軸は生成量 (単位は太陽質量)．(b): Li/B abundance 比のニュートリノ振動パラメータ依存性．横軸は $\sin^2 2\theta_{13}$ ，縦軸は Li/B abundance 比．濃灰色と中灰色の領域はそれぞれ順質量階層と逆質量階層の場合に対応．薄灰色の領域はニュートリノ振動を考慮しない場合．領域の幅はニュートリノエネルギースペクトルの不定性を考慮したもの．詳細については [1] を参照．

が増加するためである． ${}^7\text{Li}$ と ${}^{11}\text{B}$ の生成量の増加は質量階層と $\sin^2 2\theta_{13}$ に依存する．特に順質量階層で $\sin^2 2\theta_{13} > 0.001$ の場合に他の場合と比べて ${}^7\text{Li}$ 生成量の増加が大きくなる．軽元素生成量はニュートリノエネルギースペクトルの不定性にも影響を受けるが，Li/B 比をとることによりニュートリノ振動のパラメータ依存性を残すことができる．図 2 は質量階層と $\sin^2 2\theta_{13}$ に対する Li/B 比を示す．この図から順質量階層で $\sin^2 2\theta_{13} > 0.001$ の場合に他の場合と比べて Li/B 比が大きくなることがわかる．将来超新星起源の痕跡を強く残す天体において Li/B 比を精度よく測定し，超新星モデルから精度よく Li/B 比を求めることができるようになればニュートリノ振動パラメータを元素合成理論により制限することが可能となるだろう．

References

- [1] Yoshida, T., Suzuki, T., Chiba, S., Kajino, T., Yokomakura, H., Kimura, K., Takamura, A., & Hartmann, D. 2008, submitted to *Astrophys. J.*