

大質量原始中性子星からのニュートリノ駆動風における 特異な元素合成過程

藤林 翔 (京都大学大学院 理学研究科),
吉田 敬 (京都大学 基礎物理学研究所), 関口 雄一郎 (東邦大学 理学部)

Abstract

我々は、高エントロピーかつ、膨張速度が大きい物質中での重元素合成過程を調べた。その結果、バリオン 1 個あたりの電子数が 0.5 の付近で、新たな元素合成過程を発見した。この元素合成過程で、質量数が 100 を越える元素が作られる。この過程は、我々が定式化した準平衡組成 (QSE) の一種である “heavy-QSE” でよく記述できることがわかった。更に、極超新星で期待されるニュートリノ駆動風の中で起こる元素合成過程が、この heavy-QSE で記述できることがわかった。本講演ではその概要について説明する。

1 Introduction

我々は Fujibayashi et al. (2015) で、極超新星においてごく中心で起こりうる元素合成過程を調べた。その中で我々は、興味深い元素合成過程を発見した。この元素合成過程は、electron fraction Y_e (バリオン一個あたりの電子数) が 0.5 に近い時に起こるもので、結果として $A \sim 150$ 程度の陽子過剰核が合成される。この状況は Meyer (2002) の報告している元素合成過程と状況が似ていると考えられる。我々は、この元素合成過程を、Meyer et al. (1998) が定式化した準平衡 (QSE) 組成の一種である “heavy-QSE (hQSE)” 組成によって理解できることを示した。以下では、それについて説明する。

2 the hQSE abundances

この章では、我々が定式化した hQSE 組成について説明する。以下で、hQSE の定式化を行い、その後 hQSE 組成の例を挙げる。

2.1 定式化

ある温度 T 、密度 ρ 、電子の割合 Y_e 、アルファ粒子の量 Y_α を持つ原子核の系を考える。この状況のもと、自由エネルギー f を最小にするような原子核の組成を考える。即ち、自由エネルギーの変化分が全

ての原子核の量の微小変化 dY_i について停留するような原子核の組成を求める。この条件は

$$df = \sum_i \mu_i dY_i = 0, \quad (1)$$

と表される。ここで μ_i は、 i という原子核の化学ポテンシャルであり、原子核が考える温度の下では非相対論的である事を考えると

$$\mu_i = m_i c^2 + k_B T \ln \left[\frac{\rho Y_i}{m_u g_i} \left(\frac{2\pi \hbar^2}{m_i k_B T} \right)^{3/2} \right], \quad (2)$$

と書くことが出来る。ここで、 m_i と $g_i = g_i(T)$ は、 i という原子核の質量と分配関数であり、 m_u は atomic mass unit である。heavy-QSE 組成を導くためには、この停留条件を以下の四個の拘束条件の下で解く。この条件はそれぞれ、質量保存、電気的中性、重元素の量 $Y_h = \sum_{i \neq n, p, \alpha} Y_i$ が一定、そしてアルファ粒子の量 Y_α が一定となる条件である。これらの条件は、以下のように書き表せる:

$$\sum_{i \neq \alpha} Z_i Y_i = Y_e - 2Y_\alpha, \quad (3)$$

$$\sum_{i \neq \alpha} N_i Y_i = 1 - Y_e - 2Y_\alpha, \quad (4)$$

$$\sum_{i \neq n, p, \alpha} Y_i = Y_h, \quad (5)$$

NSE の場合と異なり、ここで Y_α は系の元素組成を決めるためのパラメータの一つであることに注意さ

りたい。アルファ粒子が反応平衡を達成していないため、この量は dynamical に決められるべきものである。式 (1) を、(3)-(5) の拘束条件の下で解くため、ラグランジュ未定乗数法を用いる。

2.2 hQSE 組成

実際に、hQSE 組成を求める。図 1 は、 $T_9 = T/(10^9 \text{ K}) = 5$ 、 $\rho_5 = \rho/(10^5 \text{ g cm}^{-3}) \approx 2$ 、 $Y_e = 0.5$ (エントロピー換算で $s = 140$) における核統計平衡 (NSE) 組成、準平衡 (QSE) 組成、そして hQSE 組成を描いた。ここで、QSE 組成については重元素の量を $Y_h = 0.1Y_{h,\text{NSE}}$ 、hQSE には更にアルファ粒子に量として $Y_\alpha = 0.98Y_{\alpha,\text{QSE}}$ を課した。緑色の線で表されている NSE 組成は、通常よく見られる“最も安定な鉄族元素が大きな割合を占める”ことを表している。青色の線で描かれている QSE 組成についても、ピークの位置は鉄族のままである。

一方で、hQSE は以上の 2 つよりも非常に異なる組成を示していることが分かる。これは、アルファ粒子が QSE 組成よりも少ないため、その分核子 (陽子・中性子) が多量に存在し、重元素の組成を質量数の大きな方へ押し上げるためである。

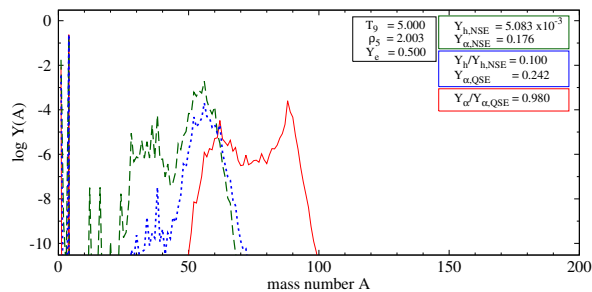


図 1: $T_9 = 5$ 、 $\rho_5 \approx 2$ における NSE、QSE、hQSE 組成。QSE 組成については $Y_h = 0.1Y_{h,\text{NSE}}$ 、hQSE 組成には更に $Y_\alpha = 0.98Y_{\alpha,\text{QSE}}$ を課した。

3 極超新星におけるニュートリノ駆動風での元素合成過程との比較

我々は Fujibayashi et al. (2015) に従い、極超新星時に期待されるニュートリノ駆動風 (極超新星風) の定常解を構成した。そして、その上で元素合成ネットワーク計算を行った。図 2 の上図は、 $T_9 \approx 5.4$ におけるネットワーク計算の組成を表している。見て分かるように、組成は鉄族がピークとなるものからはかけ離れている。中図は、ネットワークと同じ環境、つまり同じ T 、 ρ 、 Y_e 、 Y_h 、 Y_α における hQSE 組成である。A = 90-130 あたりまでの組成が、ネットワーク計算の組成とよく似ていることが分かる。下図は、実際の hQSE クラスタがどの程度広がっているのかを表した図である。実際、このあたりの元素は hQSE クラスタを形成していることがわかる。

4 Discussion

この元素合成過程は、アルファ粒子が反応平衡を達成しておらず、その量が平衡時の量よりも少ない時に起こるものである。よってこの過程は、極超新星におけるニュートリノ駆動風だけでなく、アルファ粒子を作る反応が進みにくいエントロピーが高い物質の中、または系の温度の時間発展がとても早い (膨張速度が非常に速い) ような物質の中で進むことが期待される。このような性質を持った天体現象として真っ先に思いつくのは、ガンマ線バースト (GRB) のジェットであろう。しかし火の玉モデルで考えると、ローレンツ因子を 100 程度まで上げるために要求されるエントロピーは $10^5 k_B$ にもなる。このようなエントロピーは元素合成を起こすには大きすぎる (GRB ジェットにおける元素合成は、ビッグバン元素合成によく似ている。エントロピーが高すぎて、一部の軽元素しか合成されないのである。詳しくは Beloborodov 2003, を見よ)。

しかし、GRB のジェットを駆動するエンジンは、同時によりバリオンを多く含んだ Outflow をジェットの周りに起こすのが自然と思われる。ジェットを

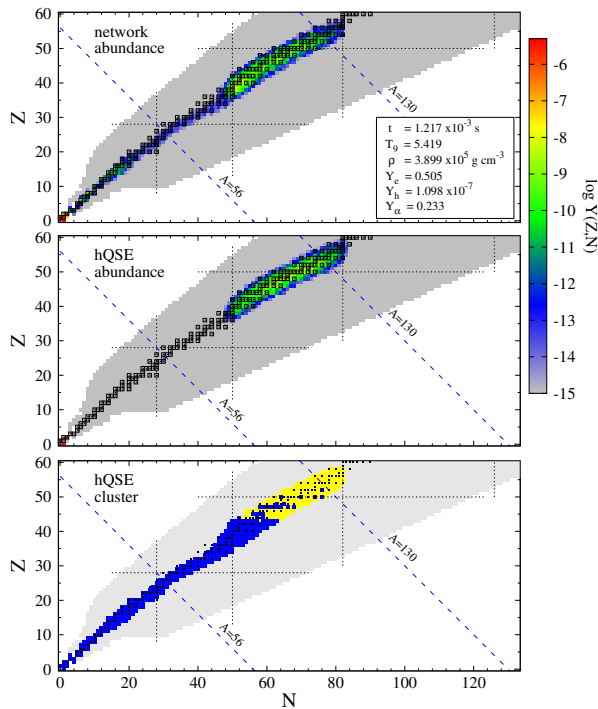


図 2: 上図: $T_9 \approx 5.4$ での、極超新星風におけるネットワーク計算での元素組成。中図: $T, \rho, Y_e, Y_h, Y_\alpha$ をネットワーク計算から算出し、それを用いて構成した hQSE 組成。下図:hQSE クラスターの広がりを表した図。黄色で表した原子核が同じ hQSE クラスターである。

駆動するエンジンが何らかの影響により弱い場合や、ジェットへバリオンを供給する過程がより強く働く場合は、失敗 GRB となることが期待されるが、その際の Outflow の中にはちょうどよい程度のエントロピーをもつ物もあるであろう。heavy-QSE 元素合成は、そのような現象で起こることが期待できる。

5 Conclusion

我々は、大きな膨張速度、若しくは大きなエントロピーを持つような物質中の元素合成過程を調べた。十分に大きな膨張速度やエントロピーを持つ物質中では、トリプルアルファ反応だけでなく、核子からアルファ粒子を合成するような反応も十分に起こらない。そのような物質中では、従来考えられてきた QSE とは異なる元素合成過程が起こることが分かっ

た。我々はその元素組成が、アルファ粒子の量を拘束条件に加えた、新たな QSE (heavy-QSE) 組成でよく説明できることを示した。

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

- Beloborodov, A. M. 2003, *ApJ*, 588, 931
- Fujibayashi, S., Yoshida, T., & Sekiguchi, Y. 2015, in prep.
- Meyer, B. S., Krishnan, T. D., & Clayton, D. D. 1998, *ApJ*, 498, 808
- Meyer, B. S. 2002, *Physical Review Letters*, 89, 231101