

## collapsar モデルにおける磁気粘性アウトフローと $r$ -process

福田 遼平 (九州大学大学院 理学府物理学専攻)

### Abstract

鉄より重い原子核の合成過程として、速い中性子捕獲過程  $r$ -process がある。しかしそれが宇宙のどこで起きているかは現在でも議論が続いている。本研究では、特に銀河初期の  $r$ -process 起源として、collapsar を提案する。collapsar は本来ガンマ線バーストのメカニズムとして考案されたものであり、collapsar から発せられるジェットにおける  $r$ -process はいくつか研究がなされてきた。今回はジェットではなく、降着円盤からの粘性アウトフローに着目し、 $r$ -process が起きうる指標である電子フラクション  $Y_e$  を調べた。結果として、 $Y_e > 0.25$  の物質が  $0.1M_{\odot}$  程度放出されていることが分かった。

## 1 Introduction

金や白金、ウランのような鉄より重い元素の起源の一つとして  $r$ -process がある。これは速い (rapid) 中性子捕獲過程のことで、種となる原子核がベータ崩壊する間もなく中性子をいくつも捕獲し重い原子核を形成していくものである。 $r$ -process が提唱されてから半世紀以上が経つが、その起源となる天体は未だ完全には解明されていない。長年、超新星爆発時のニュートリノ駆動風がその起源と考えられていた。原始中性子性星から放出されるニュートリノによって飛ばされる物質は、高エントロピーで中性子過剰であるとされていたため、 $r$ -process で重元素を合成するのに有利であると考えられていたのである。しかし、近年行われるようになった現実的ニュートリノ輸送を含めた相対論的な爆発シミュレーションにより、期待されていたような高エントロピーや中性子過剰性が実現しないことが分かった。したがって、ニュートリノ駆動風は  $r$ -process の起源として不適切であるという見方が強まっている。

超新星爆発のニュートリノ風のほかに  $r$ -process の起源とされているのが、中性子性の合体である。その極端な中性子過剰性により、非常に重い  $r$ -process 元素を合成し、観測されている  $r$ -process 元素の組成比を再現している (e.g. Korobkin et al. 2012)。これは中性子性合体が robust な  $r$ -process サイトになりうることを示している。中性子性合体の持つ問題の一つとして発生率の不定性が大きいという点が挙げられるが、さらに重大な点として金属欠乏星に

$r$ -process 元素が存在していることを説明できないという問題があり、現状では少なくとも銀河初期における  $r$ -process 元素の起源は中性子星ともニュートリノ駆動風とも言い難い。

銀河初期の  $r$ -process サイトとして (Winteler et al. 2012) では、強磁場・高速回転の星の爆発を挙げている。爆発前の星がそのようなプロファイルを持っていると、中心付近の中性子過剰な物質をくみ上げることができるため、非常に重い  $r$ -process の組成まで再現している。問題点としては、強磁場と高速回転が物理的に共存できるか不明であり、星の存在そのものに疑問が残ることである。

以上のような現状を考慮し、本研究では  $r$ -process サイトとして collapsar を提案する。collapsar はガンマ線バーストの中心エンジンとして考案された爆発メカニズムである (Woosley 1993)。 $25M_{\odot}$  を超えるような重い星が高速で回転していると、重力崩壊時にブラックホールと降着円盤の系をつくる。そして細く絞られたジェットを放出すると、ガンマ線バーストとなる。今回は降着円盤からの粘性アウトフローに着目した。降着円盤は高密度になるため、電子捕獲が進み中性子過剰になりうる。したがって降着円盤からのアウトフローでは  $r$ -process が起きる可能性がある。

## 2 Methods

流体シミュレーションには ZEUS-2D コード (Stone & Norman 1992) を使い、progenitor には (Hashimoto 1995) の  $8M_{\odot}$  を使用する。回転は差動回転を仮定し、

$$\Omega = \Omega_0 \frac{r_0^2}{r^2 + r_0^2} \quad (1)$$

で与える。 $\Omega_0$  はパラメータで、 $r_0 = 1000\text{km}$  はおよそ鉄コアの半径。粘性の起源は磁気回転不安定性 (Magneto-Rotational Instability ; MRI) であると考えられるが、慣習的に用いられている  $\alpha$  粘性 ( $\nu = \alpha c_s H$ ) を採用する。これにより円盤内のせん断粘性を再現する。また、中心から  $50\text{km}$  の地点に到達して物質はすべてブラックホールに落ち込むという境界条件を課す。ブラックホールの重力は厳密には一般相対論的にあらわされるべきであるが、近似的な重力として Pseudo-Newtonian 重力 (Paczynski & Witta 1980)

$$\Phi = -G \frac{1}{r - r_g} \quad (2)$$

を用いる。ただし  $r_g = 2GM/c^2$  はシュバルツシルト半径。降着円盤内では電子陽電子対消滅やベータ崩壊でニュートリノが生成される。本来ニュートリノの振る舞いはボルツマン方程式を解いて決める必要がある。しかしこれを解くのは非常に難しいため、(Di Matteo et al. 2002) の手法を用いて冷却の効果のみを取り入れる。以上の手法で重力崩壊から円盤形成とアウトフロー放出までを追う。

## 3 Results

いくつかのパラメータでシミュレーションを行ったが、粘性パラメータ  $\alpha = 0.1$  では加熱が十分に働かずアウトフローが起こらなかった。図 1 は、流体シミュレーションの結果を Lagrange 的な流体粒子に焼き直したもので、 $\alpha = 0.1$ 、 $\Omega = 5s^{-1}$  のモデルのアウトフロー放出の様子を示している。 $\alpha$  粘性により中心付近から物質が放出されているのがわかる。円盤内の密度は最大で  $10^9\text{gcm}^{-3}$ 、温度は  $10^{10}\text{K}$  程度まで上がっていた。

図 2 は同じモデルでのさまざまな電子フラクシオン

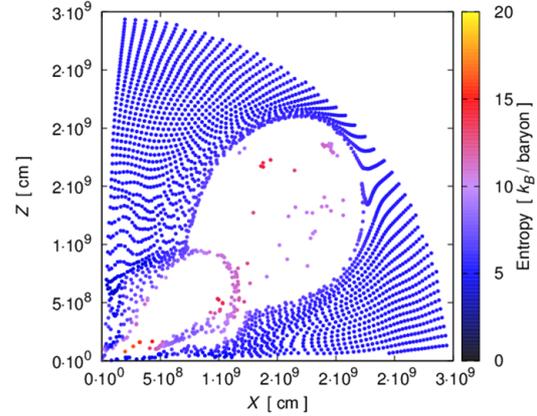


図 1:  $t \simeq 8.4\text{s}$  のアウトフロー放出の様子。各点は流体シミュレーションの結果を Lagrange 描像に直した時の流体粒子をあらわしており、色はエントロピーに対応する。

$Y_e$  を持つ粒子の放出量をあらわしたヒストグラムである。 $Y_e$  が低い物質が多いほど重い  $r$ -process 元素が多く合成されやすくなる。放出された物質は最小で  $Y_e \sim 0.27$  であり、全体では  $10^{-3}M_{\odot}$  オーダーの質量が放出されていることがわかる。

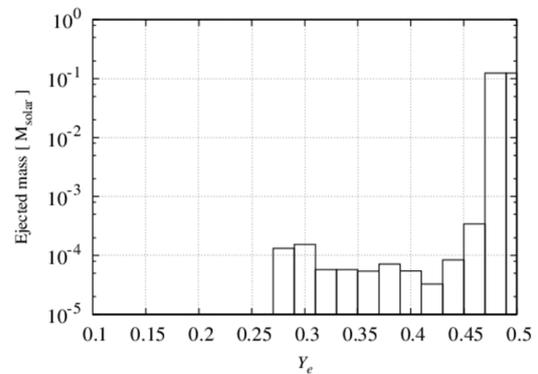


図 2:  $Y_e$  ごとの放出された質量。

## 4 Discussion & Conclusion

銀河は星形成と超新星爆発を繰り返して元素組成を変化させていく。 $r$ -process 元素に関しても同様にして、現在の太陽系組成は作られたと考えられる。ところが、 $r$ -process 元素の起源となる天体は、一つ

ではない。 $r$ -process には、すべての  $r$ -process 元素を作る main  $r$ -process と、質量数  $A=130$  以下の  $r$ -process 元素を作る weak  $r$ -process がある。それぞれの  $r$ -process を起こす天体を考慮することで初めて、銀河の化学進化を説明できるといえる。

今回のシミュレーションにより、collapsar の降着円盤からのアウトフローで中性子過剰な物質が放出されることが分かり、collapsar でもどちらかの  $r$ -process が起きると思われる。実際の  $Y_e$  は 0.27 程度まで下がり、 $r$ -process は十分起こりうることが分かった。この  $Y_e$  の値で main  $r$ -process を起こすには、核子あたりのエントロピーが  $100k_B$  は必要であるが、本シミュレーションではそのような高いエントロピーは得られず、せいぜい数十  $k_B$  であった。したがって、collapsar は少なくとも weak  $r$ -process の起源となり銀河進化を議論するうえで重要な  $r$ -process サイトとなる可能性があり、今後さらなる元素合成計算並びにパラメータサーチを行う必要がある。

## Reference

- [Winteler et al. 2012] Winteler C., Kappeli R., Perego A., Arcones A., Vasset N., Nishimura N., Liebendorfer M., Thielemann F.-K., 2012, ApJ, 750, L22.
- [Paczynski & Witta 1980] Paczynski, B., and Witta, P. J. 1980, A&A, 88, 23.
- [Hashimoto 1995] M.Hashimoto, 1995 Progress of Theoretical Physics, vol. 94, no. 5, pp. 663-736.
- [Stone & Norman 1992] J. M. Stone and M. L. Norman, ApJ, 616, 1086.
- [Korobkin et al. 2012] Korobkin O., Rosswog S., Arcones A., Winteler C., 2012, MNRAS, 426, 1940.
- [Woosley 1993] Woosley, S. E. 1993, ApJ, 405, 273.
- [Di Matteo et al. 2002] Di Matteo .T, Perna .R, Narayan .R, 2002, ApJ 579, 706.