

## 超大質量星の重力崩壊に伴う爆発現象

松本 達矢 (京都大学大学院 理学研究科)

### Abstract

超大質量星 (Supermassive star:SMS) は初期宇宙における超大質量ブラックホール (Supermassive black hole:SMBH) の種 BH を提供する天体として、その進化・形成が盛んに議論されている天体である。最近の研究によって、SMS の進化過程は急速に理解が進んだと言える。しかし、SMS は初期宇宙に存在する天体であるため、観測が非常に難しく、これらの理論は観測的検証がほとんど行われていない。本研究では、SMS の観測可能性として、SMS の重力崩壊に伴う爆発現象に着目する。爆発現象としてはガンマ線バースト (Gamma ray burst:GRB) のような jet を伴った爆発を考察する。現在までに、SMS の進化計算から得られている SMS の密度分布を用いて、SMS 中での jet propagation を数値計算した結果、jet breakout することが分かった。この結果をもとにして、SMS burst の prompt emission や afterglow などの観測可能性・特徴などを議論することが可能である。

### 1 Introduction

銀河は、恒星に次ぐ重要な天体の基本単位である。銀河の特徴として、ほとんどの銀河中心には質量  $10^{6-9} M_{\odot}$  もの SMBH が存在することが挙げられる。SMBH の起源は、初期宇宙に恒星の重力崩壊で形成された恒星質量 BH がガス降着により質量を獲得したものだと考えられている。しかし、近年、 $z \simeq 7$  の初期宇宙においても質量  $10^9 M_{\odot}$  の SMBH が観測された。初期宇宙ではガス降着によって BH が成長するには時間が足りず、この SMBH の起源は謎に包まれている。現在、初期宇宙の SMBH の形成シナリオとして有力視されているのが、SMS の重力崩壊による形成シナリオである。SMS とは、宇宙初期に形成される質量  $10^5 M_{\odot}$  をもつ巨大な恒星である。SMS の重力崩壊による SMBH 形成シナリオとは、この SMS の重力崩壊によって形成される大質量の種 BH がガス降着によって成長していくというもので、観測されている SMBH の存在を無理なく説明できる。こうした背景から、SMS の進化過程が注目を集め、盛んに議論されてきた。現在までに、SMS の進化計算 (Hosokawa et al. 2013) や個数密度の計算 (Dijkstra et al. 2014) などが行われている。

このように、SMS の進化過程の理論研究は大きく進展した。しかし、これらの理論の観測的検証はほとんど行われていない。SMS は  $z \simeq 10$  の初期宇宙に

おいて形成される考えられており、観測されるためには十分大きな光度をもたなくてはならない。恒星が生涯で最も明るく輝くのは恒星の重力崩壊に伴う爆発現象である。よって、遠方の恒星の観測手段として、その爆発現象に着目することは非常に有効である。このような例として GRB が挙げられる。GRB は恒星が一生を終え、重力崩壊する際に起こると考えられている爆発現象で、宇宙で最も明るい爆発として知られている。GRB は非常に大きな光度をもつため、遠方でも観測することが可能であり、すでに GRB を利用した初期宇宙探査などが議論されている (Bromm & Loeb 2002)。同様に、SMS の観測的検証にも SMS の重力崩壊に伴う爆発現象を考察することが重要であると考えられる。SMS を progenitor とする GRB はほとんど議論されておらず、その観測的特徴は不明である。

本研究では、SMS の重力崩壊時に GRB のような jet を伴った爆発現象が起こると考え、その観測的特徴・性質を预言する。

### 2 Supermassive star burst

SMS が重力崩壊したときに生じる爆発現象を GRB の collapsar シナリオをもとに考察する (Suwa & Ioka 2011; Nakauchi et al. 2012)。重力崩壊時に、SMS

中心部には BH が形成される。さらに、この BH 近傍で jet が形成され、SMS の表面へ伝播する。Jet luminosity は、この BH に落下していく物質のもつエネルギーの一部が jet のエネルギーに変換されると考え、BH への質量降着率から見積もることができる。Jet へ供給されるエネルギーが分かると、jet の先端部分 (jet head) の速度を求めることができ、jet head の運動が分かることになる。

## 2.1 Collpase

重力崩壊を次のようなモデルで考える。SMS の各 mass shell はその半径で与えられる free fall time  $t_{ff} \simeq \sqrt{\frac{r^3}{GM_r}}$  で中心の BH に落下する。ゆえに、質量降着率は半径  $r$  までの including mass  $M_r = \int_0^r 4\pi r'^2 \rho dr'$  を用いて、

$$\dot{M}(t) = \frac{dM_r}{dt_{ff}} \quad (1)$$

と与えられる。本計算では、SMS の密度分布として (Hosokawa et al. 2013) に与えられているものを fitting して用いた (図 1)。

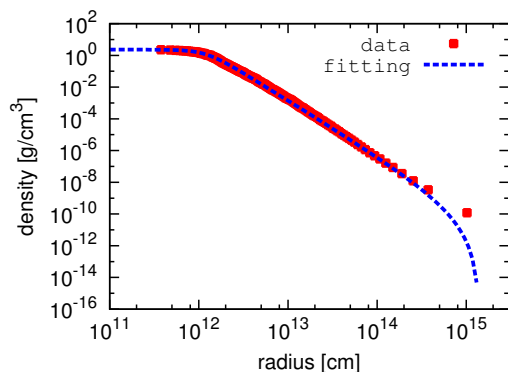


図 1: SMS の密度分布。データ点は (Hosokawa et al. 2013) に与えられている SMS の密度分布 (質量座標の関数) を半径の関数として計算し直したもの。Fitting 関数は中心部分と外層部分を別々に fitting し、適当な半径でつなぎ合わせた。

## 2.2 Jet propagation

Jet の伝播の考察は、主に (Bromberg et al. 2011) に従う。GRB のように、SMS が重力崩壊すると相対

論的 jet が中心の BH 近傍に形成され、表面に向かって伝播する。Jet の形成メカニズムは理論的に未解明であるが、ここでは Blandford-Znajek 機構を念頭にし、jet luminosity は中心 BH への質量降着率から

$$L_j(t) = \eta_j \dot{M}(t) c^2 \quad (2)$$

と与える (Suwa & Ioka 2011)。ここに、 $\eta_j = 6.2 \times 10^{-4}$  は BH に落下する物質のエネルギーから jet へのエネルギーへの変換効率を与えるパラメータであり、同様の解析を Wolf-Rayet 星に適用したとき、jet の全エネルギーが標準的な GRB の jet のエネルギー  $E_j = 10^{52} \text{erg}$  となるように与えてある。なお本計算では、SMS のコア ( $r_{core} \simeq 2 \times 10^{12} \text{cm}$ ) まだが重力崩壊した時刻を初期時刻として、コア付近から jet の運動を計算した。

Jet は相対論的流体からなり、SMS を構成している物質 (ambient matter) と衝突することで衝撃波を生じ、jet head を形成する。Jet head で圧縮された流体は sideway expansion によって jet head から側方に流出し、cocoon を形成する。Jet の伝播は jet head での運動量の釣り合いから、次のように与えられる (Matzner 2003)。

$$\beta_h = \frac{\beta_j}{1 + \tilde{L}^{-\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

$$\tilde{L} \simeq \frac{L_j/c}{\Sigma_j \rho_a c^2} \quad (4)$$

ここで、 $\beta_h, \beta_j, L_j, \Sigma_j, \rho_a$  はそれぞれ jet および jet head の速度、jet luminosity、jet cross section、ambient matter (ここでは SMS のコアより外を構成する物質) の密度である。Jet cross section は conical jet の伝播を考える場合、jet head の位置  $r_h$  と jet の opening angle  $\theta$  を用いて  $\Sigma_j = \pi(r_h \theta)^2$  となる。Cocoon の伝播も運動量の釣り合いから、

$$\beta_c = \sqrt{\frac{P_c}{\rho_a c^2}} \quad (5)$$

と与えられる (Begelman & Cioffi 1989)。ここで、 $P_c$  は cocoon 内の平均的な圧力であり、jet head から流入する輻射優勢な流体が担っているとして計算する。よって、jet luminosity  $L_j$  と SMS の密度分布  $\rho_a(r)$  が分かれば jet head と cocoon の位置の時間発展が

計算できる。GRB のような jet を伴う爆発現象が起こる条件は、

1. collapse 中に jet breakout が起こる
2. jet が cocoon に飲み込まれない

である (Matzner 2003)。以下の計算結果では、この 2 条件が成立していることを確かめなければならない。

### 3 Results

Jet propagation を計算した結果を図 2、3、4 に示す。図 2 から、collapse 中に jet が SMS の表面に到達し、jet breakout していることが分かる (条件 1)。また図 3 からは、jet の速度は常に cocoon の速度よりも大きく、jet は cocoon に飲み込まれることなく SMS 中を伝播していることがわかる (条件 2)。よって、爆発のための条件は満たされており、SMS 中を jet が伝播し GRB のような爆発現象が起こることが分かる。さらに、図 4 からこの burst は jet breakout 後も非常に長時間 ( $\approx 2 \times 10^7 \text{ sec}$ ) 継続する prompt emission を放射することが分かる。

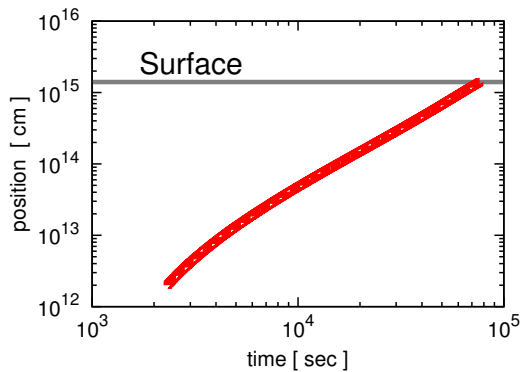


図 2: SMS 中を伝播する jet head の位置の時間変化。SMS の全質量が中心の BH に落下する時間 ( $t_{ff} \approx 2 \times 10^7 \text{ sec}$ ) よりも早く jet head が SMS 表面に到達し、jet breakout していることがわかる。

### 4 Conclusion

本研究では、SMS の重力崩壊に伴う爆発現象について、その観測可能性・性質を議論する最初のステップとして SMS 中での jet propagation を計算した。

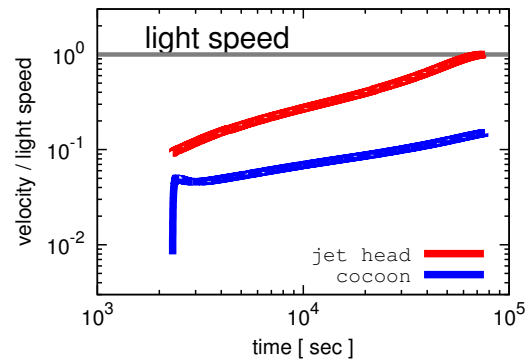


図 3: SMS 中を伝播する jet head と cocoon の速度の時間変化。jet head の速度は常に cocoon の速度よりも大きいことがわかる。

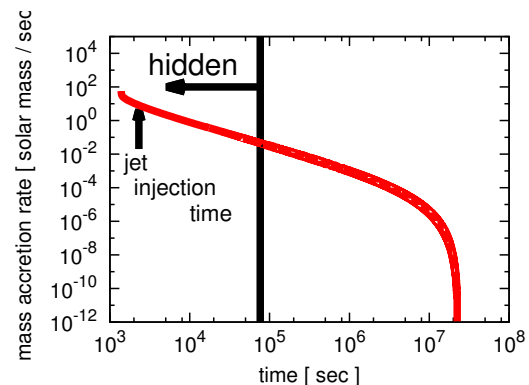


図 4: SMS の中心に形成される BH への質量降着率の時間変化。図中の矢印の時刻から jet propagation を計算した。中央の縦線は jet breakout の時刻を表しており、この時刻以降、prompt emission が観測できる。

計算の結果、jet は collapse 中に表面に到達し、GRB のような爆発現象を起こすことが確認できた。さらに、breakout 後の prompt emission は通常の GRB に比べてかなり長い時間継続することがわかった。今後、この結果をもとに SMS burst の cocoon emission や afterglow を計算し、その観測可能性・性質を考察していく。

### 5 Acknowledgement

本計算を進めるにあたり、適切かつ丁寧な指導・議論をして頂いた KEK の井岡邦仁准教授、京都大学の仲内大翼さんに感謝申し上げます。また、日頃からお世話になっている京都大学天体核研究室、基礎

2014 年度 第 44 回 天文・天体物理若手夏の学校

物理学研究所宇宙グループの皆様にも感謝いたします。  
ありがとうございました。

## Reference

- Bromberg, O., et al. 2011, ApJ, 740: 100  
Bromm, V., & Loeb, A. 2002, ApJ, 575: 111  
Begelman, M. C., & Cioffi, D. F. 1989, ApJ, 345, L21  
Dijkstra, M., et al. 2014, MNRAS, 442, 2036  
Hosokawa, T., et al. 2013, ApJ, 778: 178  
Matzner, C. D. 2003, MNRAS, 345, 575  
Nakauchi, D., et al. 2012, ApJ, 759: 128  
Suwa, Y., & Ioka, K. 2011, ApJ, 726: 107