

## Failed SN における降着円盤からの輻射の研究

中西 俊貴 (早稲田大学大学院 先進理工学研究科)

### Abstract

ブラックホールなどの高密度コンパクト天体の周りには一般に降着円盤が形成されると考えられている。本研究では Failed SN と呼ばれる現象の後にできる降着円盤からの放射を計算した。これにより、重力波のカウンターパートとしての降着円盤の可能性を探した。基礎方程式を元に円盤の時間発展を追ひ、観測が可能であるかの考察を行った結果、 $10^{39}$  erg/s ものエネルギーを放出する事がわかり、MAXI での観測は十分に期待されるという結論がでた。この夏の学校では、本研究でのモデルやメソッド等を発表していきたい。

## 1 Introduction

ブラックホールなどの高密度コンパクト天体の周りには一般に降着円盤が形成されると考えられている。私の研究は、その降着円盤から放出されることが期待されるエネルギー輻射の光度とエネルギースペクトルを数値計算で求めることである。その目的は、それ自体は光を出さないためブラックホールを降着円盤を通して観測することにより、ブラックホール形成の新たなチャンネルを探るとともに、その観測可能性をあきらかにすることである。特に今考えているのは Failed SN と呼ばれる天体現象である。これが起きると、重力波が発生すると考えられているが、その際には降着円盤が形成されるはずであるので、そこからの高エネルギー輻射が重力波のカウンターパートとして期待されるからである。数年後には日本の重力波観測機器「KAGRA」が立ち上がり、重力波天文学が開花すると期待されている。私の研究もその新しい天文学助けになればと考えている。

先行研究では触れられていない降着円盤からの放射を考える。また、先行研究のモデルは大きな角運動量を持っているという変わったモデルであるが、ある程度の角運動量を持っていれば降着円盤は作られるはずなので、一般的な議論に帰着する事ができると考えられる。ここでは赤色巨星、青色巨星、ウォルフライエの 3 つのモデルについて議論する。各モデルの特徴は表にまとめてある。

### 2.2 disk configuration

円盤の放射を考える前に構造を考えたい。基礎方程式は以下になる。

$$\dot{M} = -2\pi r \Sigma v_r \quad (1)$$

$$v^r \frac{dv^r}{dr} + \frac{1}{\Sigma} \frac{d\Pi}{dr} = r (\Omega^2 - \Omega_K^2) - \frac{\Pi}{\Sigma \Omega_K} \frac{d\Omega_K}{dr} \quad (2)$$

$$\frac{\dot{M}}{2\pi} \Omega \left( 1 - \sqrt{\frac{r_{in}}{r}} \right) = \alpha \Pi \quad (3)$$

## 2 Method and Model

### 2.1 Model

本研究では星の進化形成の先行研究 (Woosley, 2011) を元にモデルを考えている。これらの星は最外核で非常に大きな角運動量を持っている事が特徴である。角運動量を持っているがために、降着円盤が作られると考えられる。本研究では

$$\Pi = \Sigma \Omega_K^2 H^2 \quad (4)$$

$$Q_{adv} = Q_{vis} - Q_{rad} \quad (5)$$

$$\Pi = \Pi_{rad} + \Pi_{gas} \quad (6)$$

$v_r$  は鉛直方向の速度,  $\Sigma = \int \rho dz$  は表面密度,  $\rho$  は密度,  $\Omega$  は角速度,  $\Omega_K = \sqrt{GM/r}$  はケプラー角速度,

$H$  は円盤の厚さ,  $\Pi = \int p dz$ ,  $p$  は圧力,  $p_{gas}$  と  $p_{rad}$  はそれぞれガス圧と輻射圧であり,  $\Pi_{gas} = \int p_{gas} dz$ ,  $\Pi_{rad} = \int p_{rad} dz$  となる.  $M, \dot{M}$ ,  $\alpha$  はパラメーターでそれぞれブラックホール質量、質量膠着率、粘性パラメーター.  $\alpha$  は 0.01-0.1 の大きさである.  $\Pi_{gas}$ ,  $\Pi_{rad}$  は

$$\Pi_{gas} = \frac{2k_B}{\mu m_H} \Sigma T_c, \Pi_{rad} = \frac{aT^4}{3} 2H, \quad (7)$$

とかける.  $m_H$  は水素原子の質量,  $k_B$  はボルツマン定数,  $\mu$  は相対質量,  $a$  は輻射定数, そして  $T_c$  赤道面上の温度である.  $Q_{adv}$ ,  $Q_{vis}$ ,  $Q_{rad}$  はそれぞれ移流冷却、粘性加熱、輻射冷却である. これらは

$$Q_{adv} = \frac{\Pi}{\Sigma} \frac{\dot{M}}{2\pi r^2} \xi, \quad (8)$$

$$\xi = - \left[ \left( A + \frac{1}{2} \right) \frac{d \ln \Pi}{d \ln r} - \left( A + \frac{3}{2} \right) \frac{d \ln \Sigma}{d \ln r} - \frac{d \ln \Omega_K}{d \ln r} \right] \quad (9)$$

$A$  は 3 程度の値

$$Q_{vis} = -\alpha \Pi r \frac{d\Omega}{dr}, \quad (10)$$

$$Q_{rad} = \frac{8acT_c^4}{3\kappa\rho H}, \quad (11)$$

とかける.  $\kappa$  は不透明度である. これらの式を使い定常解を求める. 本研究では時間発展させる事に注目した. 質量保存と全角運動量保存の二点を用いる事で可能である.

$$\dot{M} = \frac{M_{disk}}{t_{acc}}, \quad (12)$$

タイムスケール  $t_{acc}$  は

$$t_{acc} \sim \frac{r_{out}^2}{\nu} \sim \frac{2}{\alpha \Omega_K}. \quad (13)$$

時間発展させるために時刻  $t$  での各値

$$M_{disk}(t) = M_{disk}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M} dt, \quad (14)$$

$$M_{BH}(t) = M_{BH}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{M} dt, \quad (15)$$

$$J_{total}(t) = J_{total}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{J}_{in} dt, \quad (16)$$

を調べる事で、値がフィットするように物理量を探した. この方法により定常解を用いながら時間発展を行った.

## 2.3 emission

最も大事な事は円盤からの放射である. 円盤の光度は

$$L = \int_{r_{in}}^{r_{out}} Q_{rad} dr. \quad (17)$$

また、スペクトルの強度は

$$S_\nu = \pi \int_{r_{in}}^{r_{out}} B_\nu 2\pi r dr = \pi \int_{r_{in}}^{r_{out}} \frac{2h}{c} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT_{eff}}} - 1} 2\pi r dr, \quad (18)$$

$B(\nu)$  はプランク函数,  $h$  はプランク定数,  $\nu$  は振動数,  $k$  はボルツマン定数, そして  $T_{eff}$  は表面温度である. 表面温度はステファンボルツマンの法則より

$$Q_{rad} = 2\sigma T_{eff}^4, \quad (19)$$

でもとまる.

## 3 Results and Discussion

結果のグラフが図 1 から 4 である. これを見ると円盤は時間とともに大きくなり明るくなっている事が見て取れる. 円盤は摩擦により外側に角運動量が輸送されるので、広がっていくのである. また、それにより円盤の面積が増えるので光度が上がっていったと考えられる. さて、ここでこの円盤からの放射が MAXI で観測できるか見積もりたい.

MAXI での測定についてまとめたものが表 2 である. これを見ると MAXI の二つのカメラでは  $\sim 10^{39} \text{ erg/s}$  ほどのエネルギーをとらえる事が出来る. それを元に考えると  $\sim 10 \text{ Mpc}$  の距離なら MAXI でとらえる事が可能であるという結論が出た. またイベントレイトを計算してみたいと思う. BH 形成が銀河で 100 年に一つ起こるとすると、年間に 10 個のイベントが起こる. この現象は十分に観測が可能である.

## 4 Conclusion

本研究では先行研究をもとに Failed SN の後に降着円盤が作られると考え、その円盤からの放射のエネルギーを見積もった. それによって重力波のカウ

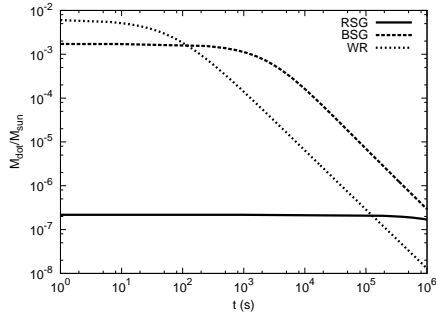


図 1: The time evolution of  $\dot{M}$ .

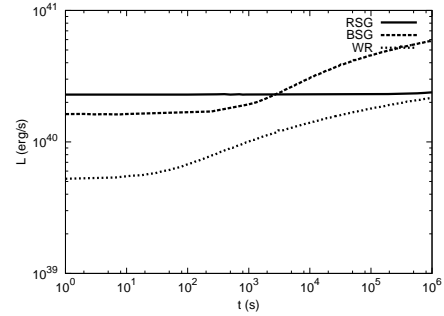


図 4: The light curve of disk

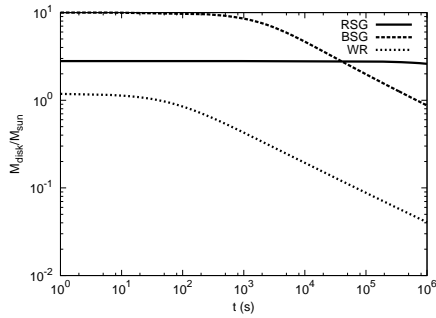


図 2: The time evolution of  $M_{disk}$

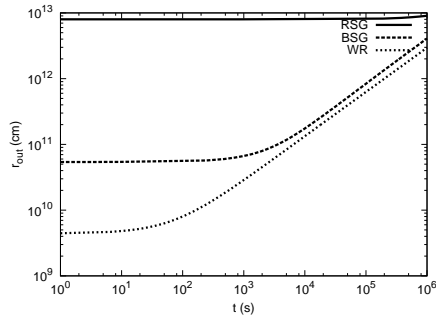


図 3: The time evolution of disk radii.

## Reference

Woosley S. E., Heger A., 2012, ApJ, 752, 32

Li X.-D., 2003, ApJ, 596, L199

ンターパートになりうるかの検証を行った。定常解を時間発展させる事に成功し、時間とともに円盤が大きくなっていくのではないかという、新たな可能性を示唆する事ができた。

結果として MAXI の観測は十分な可能性を持っており、最大年間 10 個近くのイベントが起きると考えられる。今後、本研究が観測に応用される事を期待する。

表 1: Data of model characteristics

Type	$M_{pre-SN}$ (g)	$R$ (cm)	$M_{BH}$ ( $M_{\odot}$ )	$M_{disk}$ ( $M_{\odot}$ )	$r_{disk}$ (cm)	$M_{dot}$ ( $M_{\odot}/s$ )
RSG	12.09	$0.4 - 10 \times 10^{12}$	9.3	2.8	$8.0 \times 10^{12}$	$2.2 \times 10^{-7}$
BSG	23.96	$0.1 - 9 \times 10^{13}$	14.0	10.0	$5.4 \times 10^{10}$	$1.7 \times 10^{-3}$
WR	8.043	$1 - 5 \times 10^{10}$	6.85	1.19	$4.4 \times 10^9$	$6.1 \times 10^{-3}$

表 2: Data of luminosity observed by MAXI

Type	time (s)	SSC ( $10^{38}$ erg/s)	GSC ( $10^{38}$ erg/s)
RSG	0	14.27	4.962
	$10^3$	14.39	5.065
	$10^5$	14.36	4.964
	$10^7$	15.81	5.380
BSG	0	16.49	5.720
	$10^3$	19.48	6.446
	$10^5$	29.86	8.682
	$10^7$	32.99	9.361
WR	0	6.599	2.845
	$10^3$	10.24	3.947
	$10^5$	12.37	4.441
	$10^7$	12.90	4.600