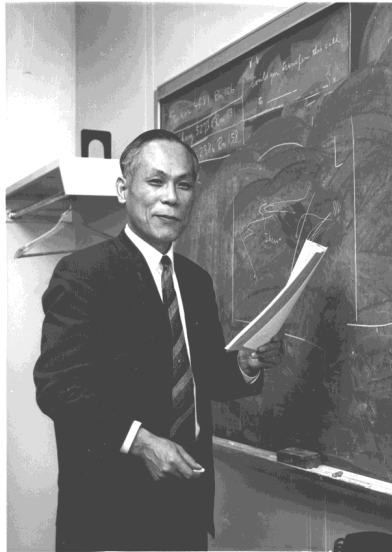


# コラプサーモデルにおける ブラックホール・ディスク系の形成

国立天文台 理論研究部  
1月から基礎物理学研究所  
関口 雄一郎

柴田 大 (京都大学)

# はじめに



NASA 0-68-10,414

星形成

恒星進化

惑星形成

宇宙論

相対論

高エネルギー天文学

超新星

4人組

数値相対論  
(中村さん)

柴田さん

私  
(関口)

# Long GRB progenitor models

- 中心天体：BH + Disk (Collapsar)

- 高速回転(ディスク形成)が必要

- Type-Ic SN の付随 (H, He外層なし)

- mass loss と同時に角運動量 loss

- 特殊な親星の進化モデルが必要

- そもそも GRB は特異な現象

- He星合体モデル (Fryer & Heger 2005)

- Tidal spin up モデル (van den Huevel & Yoon 2007)

- Chemically homogeneous evolution モデル (Woosley & Heger 2006, Yoon et al. 2006)

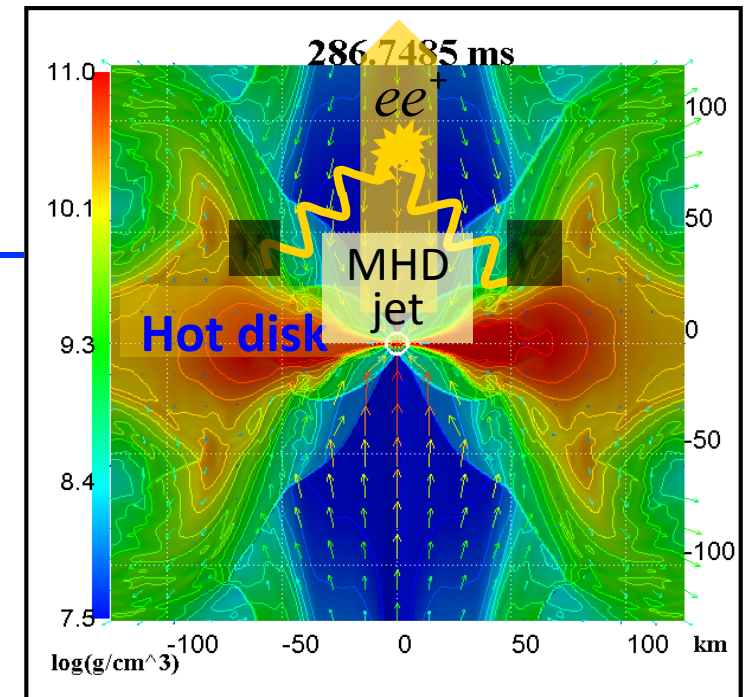
- GRBの親星コアは 高いエントロピー を持つ可能性を示唆

- 進化経路が超新星コアとは異なる

- ほとんど調べられていない (Nakazato et al. 2007, Suwa et al. 2007)

- BH + Disk 形成の数値相対論シミュレーション

Sekiguchi & Shibata 2007



# 基礎方程式と微視的物理

- Einstein 方程式 (Shibata-Nakamura, BSSN)

$$(\partial_t - \beta^k \partial_k) \phi = \frac{1}{6} (-\alpha K + \partial_k \beta^k)$$

$$(\partial_t - \beta^k \partial_k) \gamma_{ij} = -2\alpha \tilde{A}_{ij} + \gamma_{k(i} \partial_{j)} \beta^k - \frac{2}{3} \gamma_{ij} \partial_k \beta^k$$

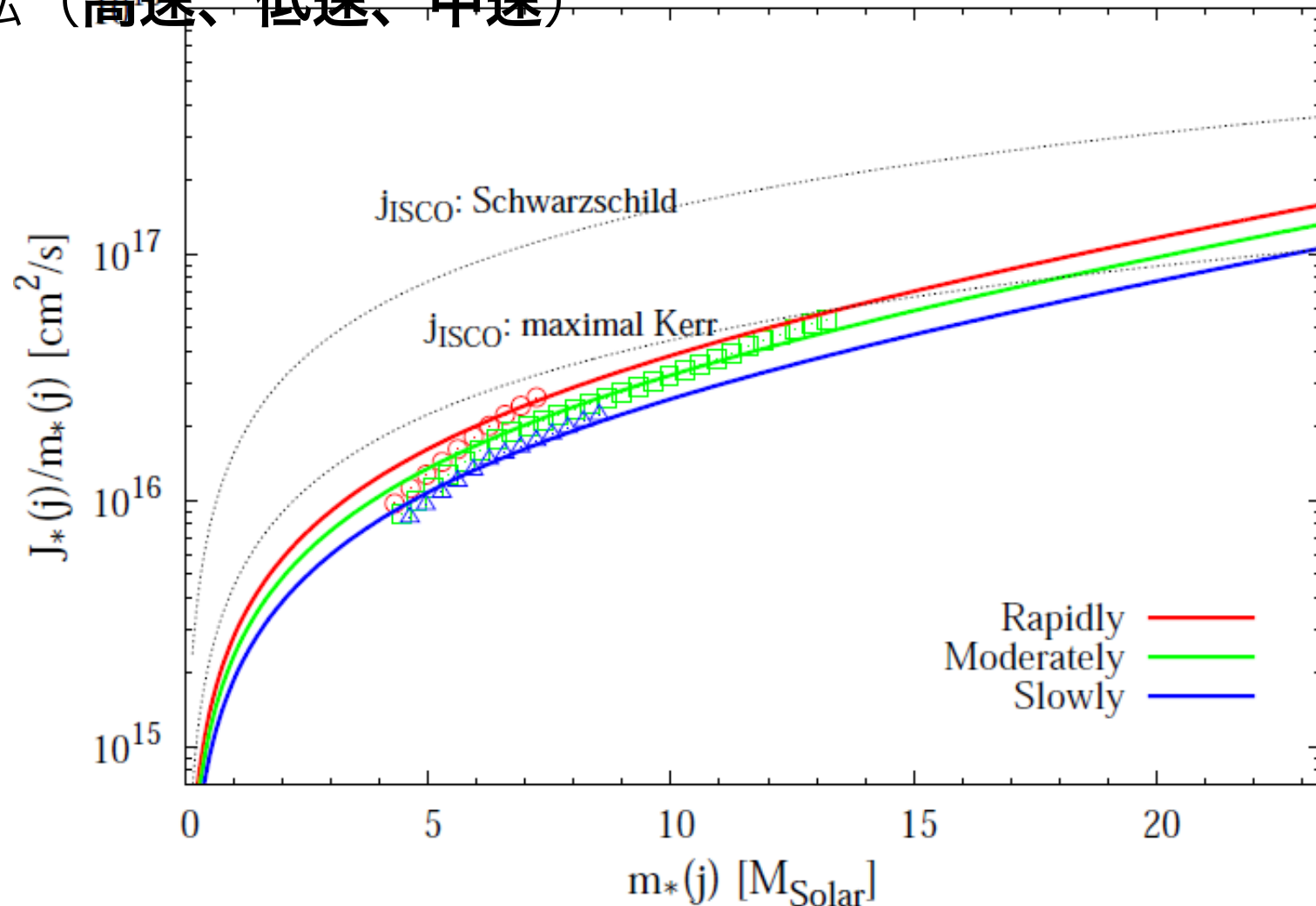
$$(\partial_t - \beta^k \partial_k) K = -D^k D_k \alpha + \left[ \tilde{A}_{ij} \tilde{A}^{ij} + \frac{1}{3} K^2 \right] + 4\pi\alpha(\rho_h + S)$$

$$\begin{aligned} (\partial_t - \beta^k \partial_k) \tilde{A}_{ij} = & e^{-4\phi} \left[ \alpha R_{ij} - D_i D_j \alpha \right]^{\text{TF}} + \alpha \left( K \tilde{A}_{ij} - 2 \tilde{A}_{ik} \tilde{A}_j^k \right) \\ & + \tilde{A}_{k(i} \partial_{j)} \beta^k - \frac{2}{3} \tilde{A}_{ij} \partial_k \beta^k - 8\pi\alpha(e^{-4\phi} S)^{\text{TF}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\partial_t - \beta^k \partial_k) F_i = & -16\pi\alpha j_i + \delta^{jk} \left[ -2A_{ij} \partial_k \alpha + (\partial_k \beta^l) \partial_l \tilde{\gamma}_{ij} + \partial_k (\tilde{\gamma}_{l(i} \partial_{j)} \beta^l - \frac{2}{3} \tilde{\gamma}_{ij} \partial_l \beta^l) \right] \\ & + 2\alpha \left[ \tilde{\gamma}^{kj} \partial_j \tilde{A}_{ik} - \partial_j A_i^j + \tilde{A}_{ik} \partial_j \tilde{\gamma}^{kj} - \frac{1}{2} \tilde{A}^{jk} \partial_i \tilde{\gamma}_{kj} + 6\tilde{A}_i^k \partial_k \phi - \frac{2}{3} \partial_i K \right] \end{aligned}$$

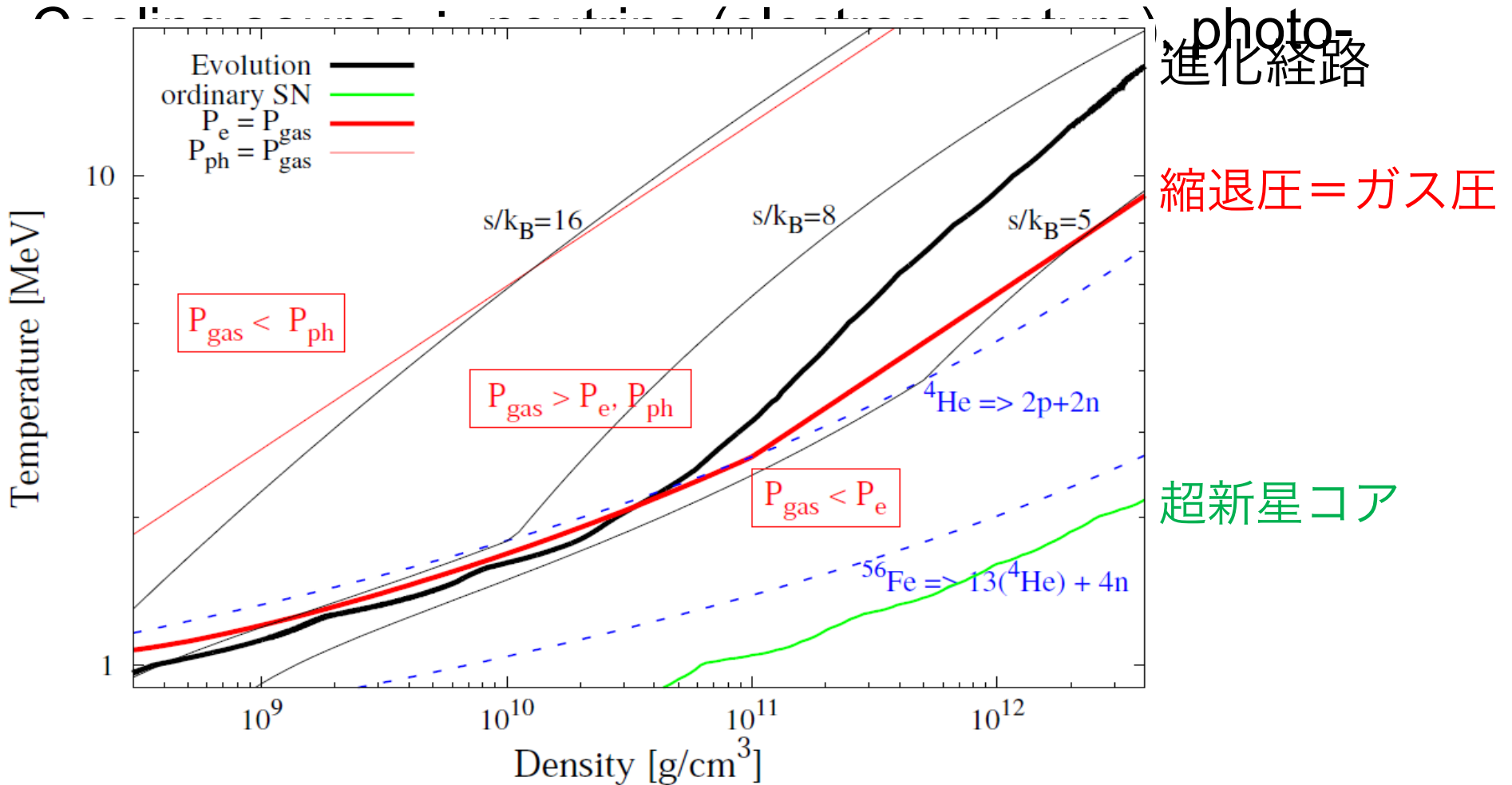
# 初期条件

- 一般相対論的球対称平衡状態（一様エントロピー( $5-8k_B$ )・Ye (0.5))
- +回転（**高速、低速、中速**）

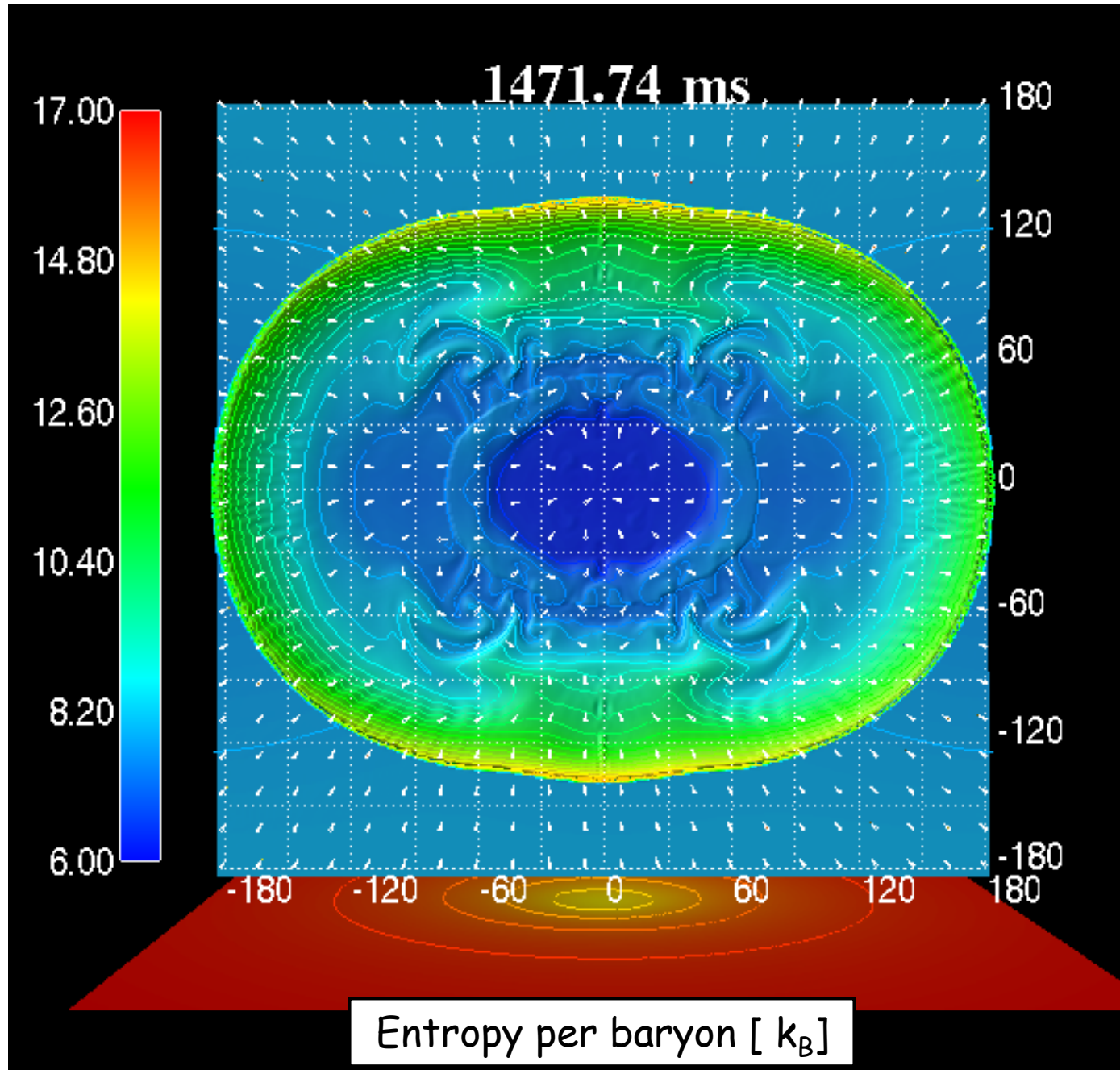


# 進化経路

- コアは ガス圧優勢領域 を通る  $\Rightarrow$  thermal bounce  $\Rightarrow$  衝撃波形成
- バウンスは弱く、すぐに 降着衝撃波 に

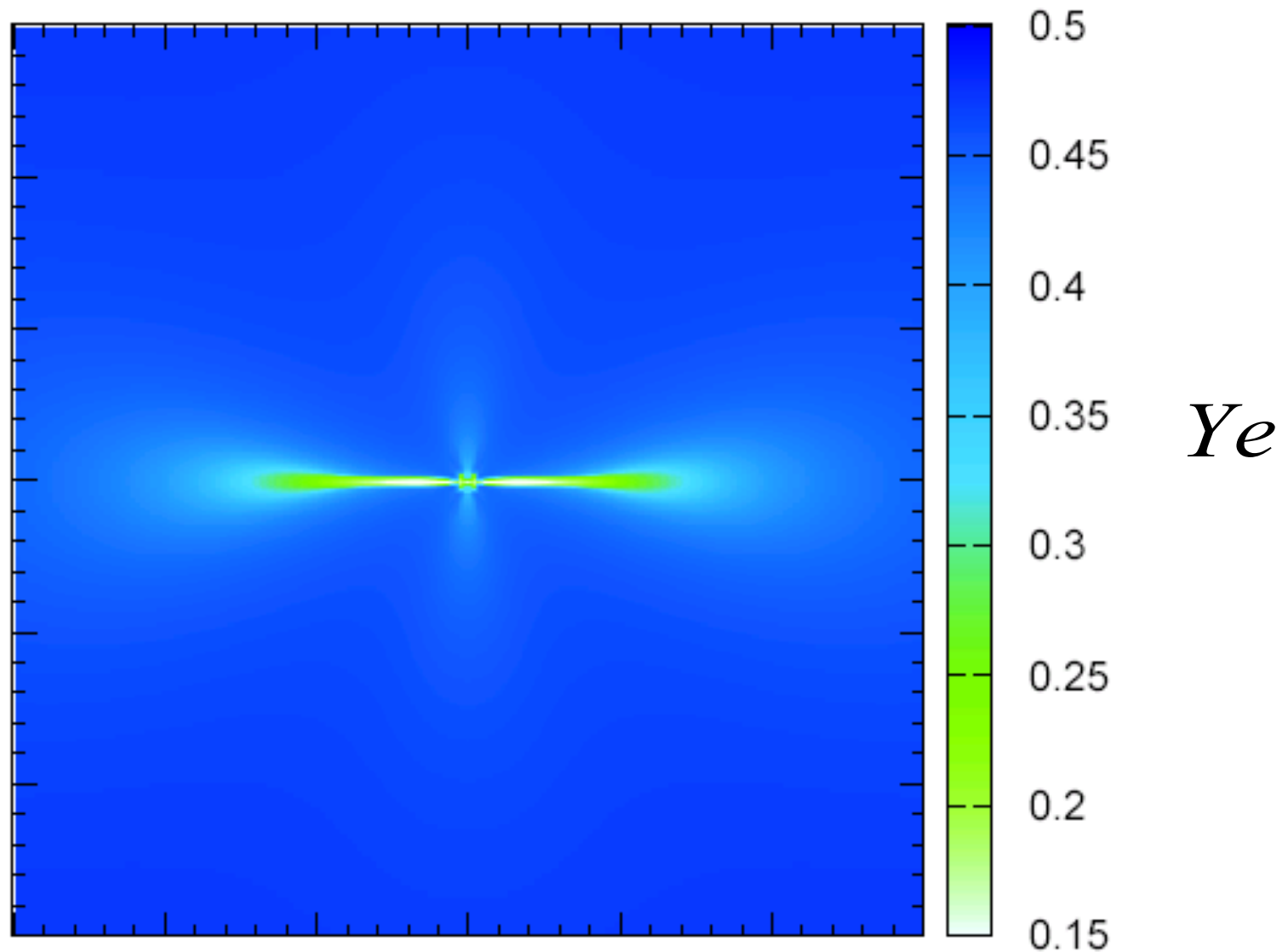


# ダイナミクス：高速回転モデル



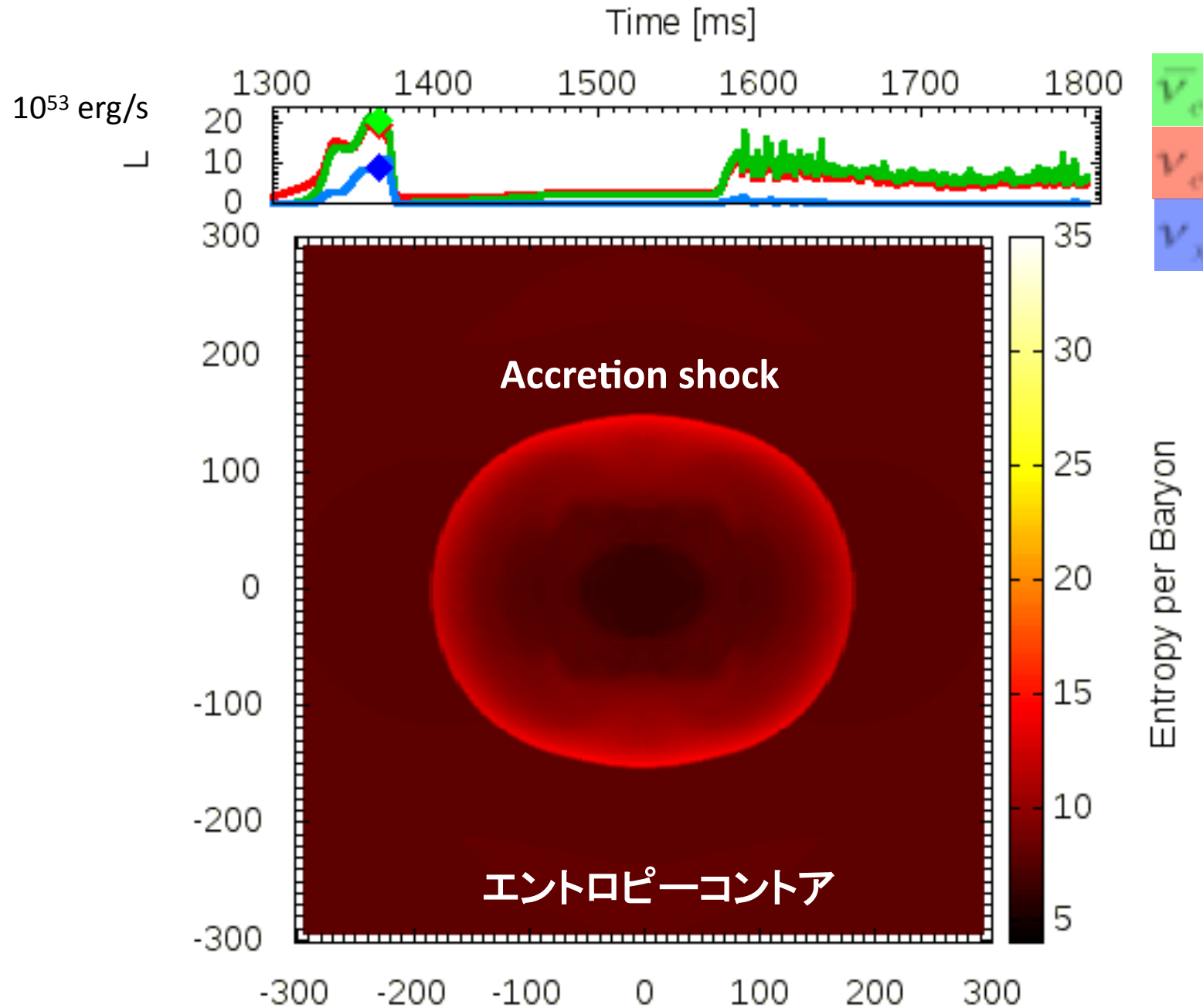
# ダイナミクス：低速回転モデル

幾何学的に薄いディスクが形成され、計算時間内ではそのまま

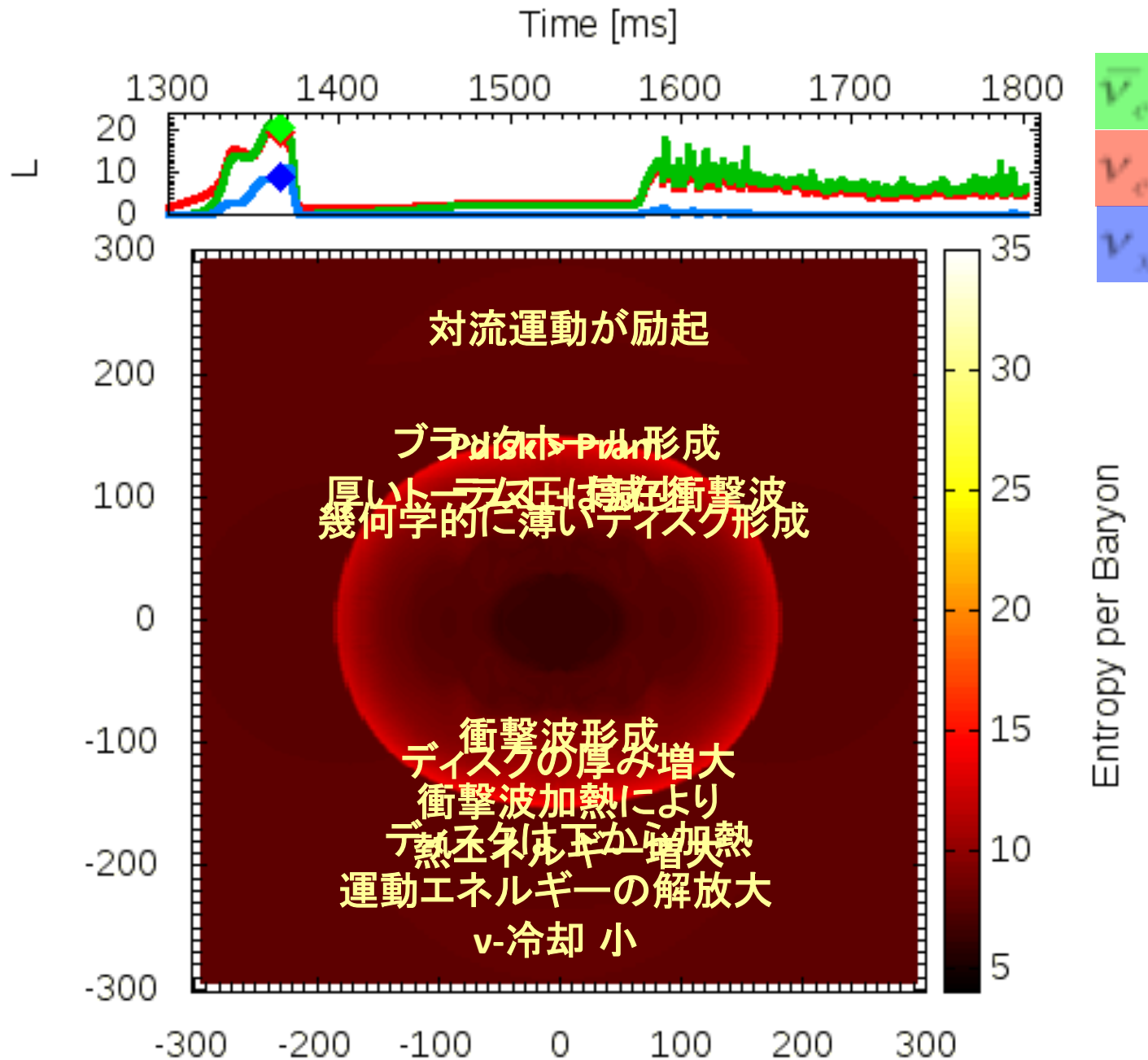




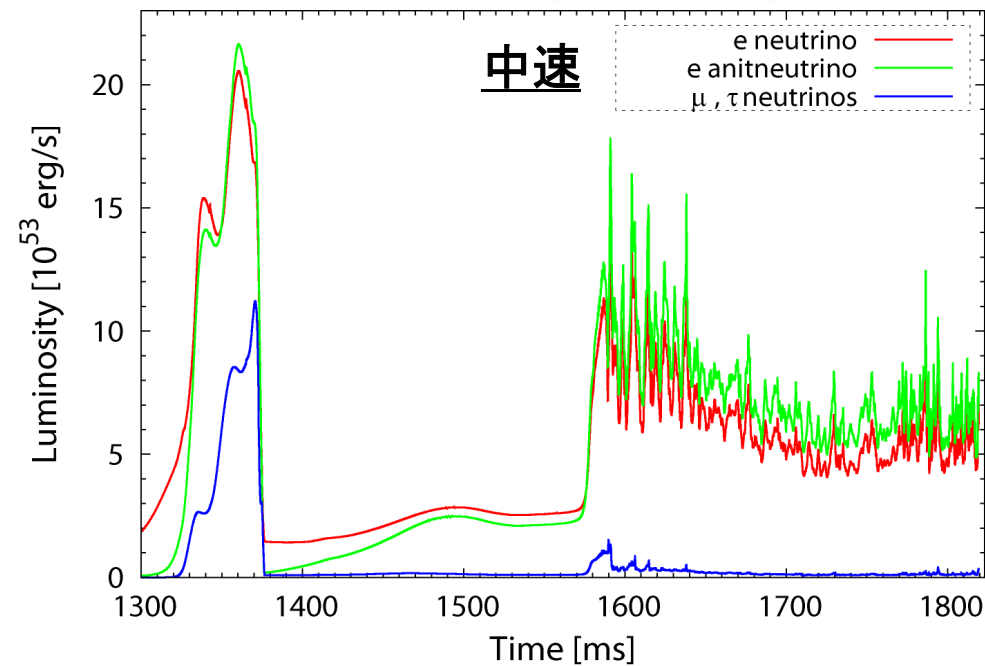
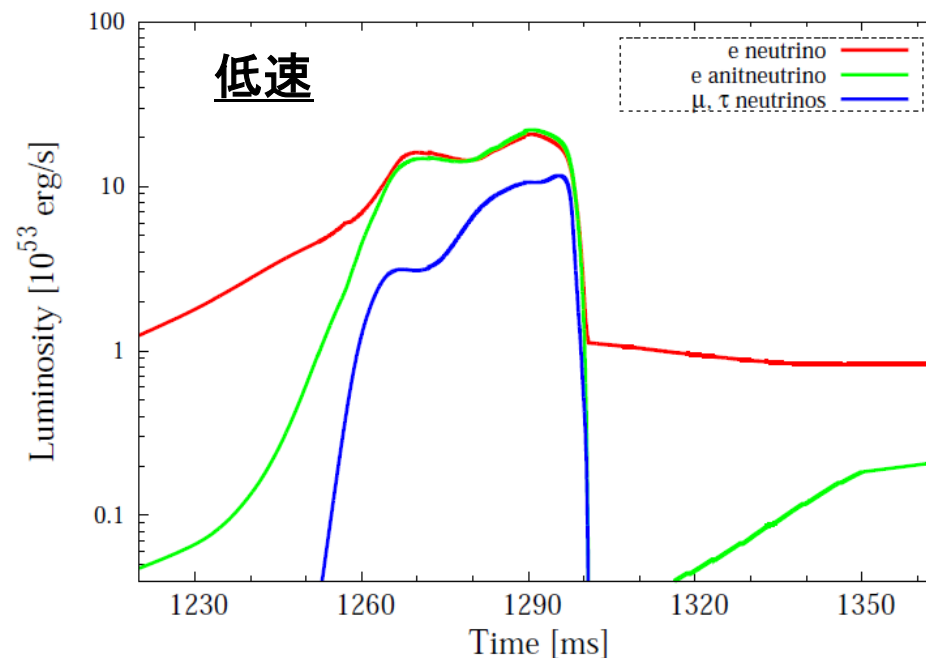
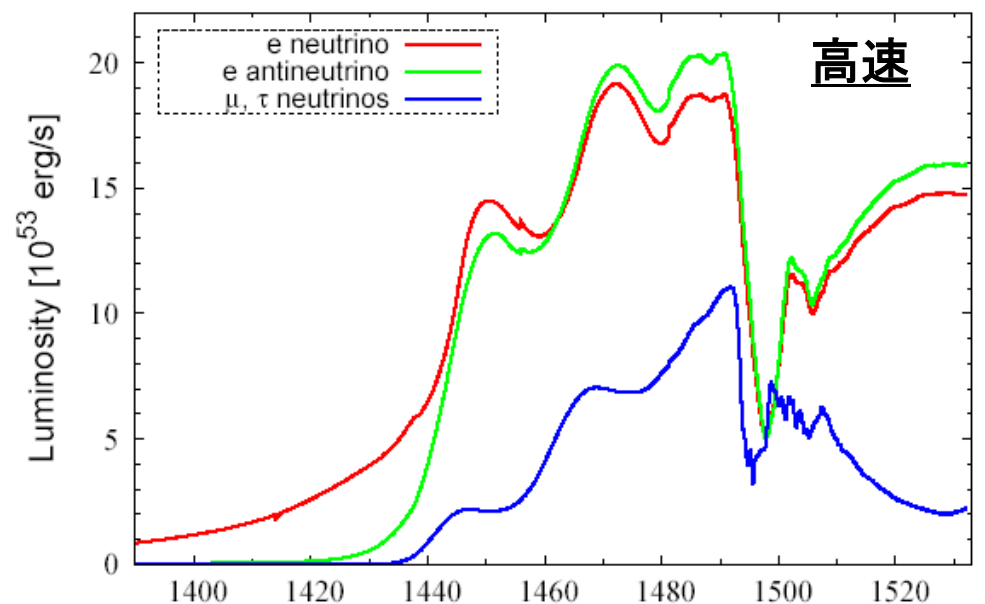
# ダイナミクス：中程度回転モデル



# ダイナミクス：中程度回転モデル



# ニュートリノ光度



- $L \sim 10^{53-54}$  erg/s
- GR effect による高い効率
- BH 形成とともに  $\nu$  sphere が飲み込まれて光度低下
- 中速回転モデルでは対流に伴う時間変動がみられる

# GRB Jet は作れるか？

## • ニュートリノ対消滅による電子・陽電子対生成

$$- \text{(eff)}_{\nu\bar{\nu}} \equiv \frac{\dot{E}_{\nu\bar{\nu}}}{L_{\nu, \text{tot}}} \sim 0.01 \left( \frac{\dot{M}}{M_{\odot} \text{s}^{-1}} \right)^{5/4} \left( \frac{M_{\text{BH}}}{10 M_{\odot}} \right)^{-3/2} \quad \text{Zalamea \& Beloborodov (2010)}$$

$$- \underline{L_{\text{pair}} \sim 10^{52} \text{ erg/s}}$$

$$- L_{\text{pair}} \propto (\text{dot } M)^{9/4}$$

## • BZ 過程によるポインティングフラックス生成

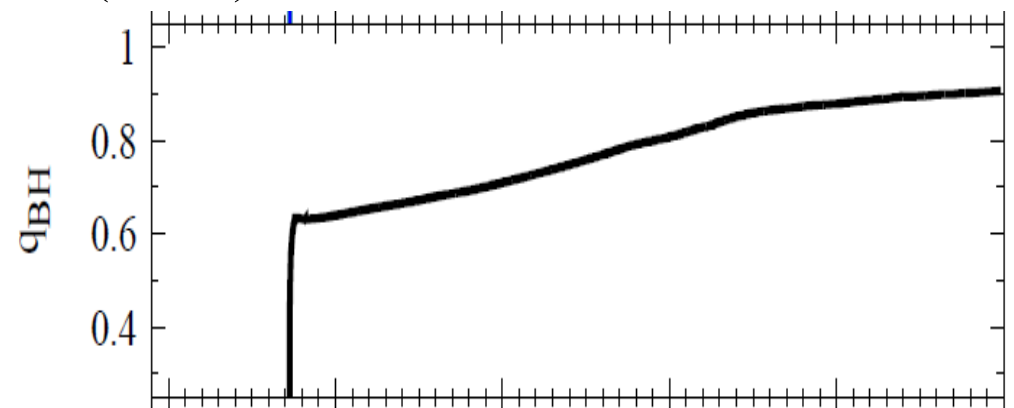
$$- \dot{E}_{\text{BZ}} \sim 10^{52} f_{\Omega_H} q_{\text{BH}}^2 \left( \frac{\dot{M}}{M_{\odot} \text{s}^{-1}} \right) \text{ erg/s} \quad \text{McKinney (2005)}$$

- $f_{\Omega} = 3$  ( $a=0.8$ ),  $10$  ( $a=0.9$ ),  $80$  ( $a=1.0$ )

- $\sim 10\%$  can be used for Jet

$$- \underline{L_{\text{BZ}} \sim 10^{51-52} \text{ erg/s}}$$

$$- L_{\text{BZ}} \propto (\text{dot } M)^1$$



# Summary

- GRB の親星は通常の超新星よりエントロピーが高い可能性
- BH-Disk 形成のダイナミクスをはじめて明らかにした
  - ガス圧によるバウンス
  - 高速回転： BH形成後直ちにトーラス+停在衝撃波形成
    - ほぼ対流安定 (epicyclic mode による安定化)
  - 低速回転： BH形成後幾何学的に薄いディスク形成
    - 計算時間内では変化なし ⇒ 後期にトーラス？
  - 中速回転： thin disk ⇒ thick torus + 停在衝撃波
    - 対流不安定
- 高いニュートリノ光度  $\sim 10^{54}$  erg/s
- 対流 ⇒ 激しく時間変動するニュートリノ光度、( $\dot{M}$ )

# Future work

- より現実的な初期条件

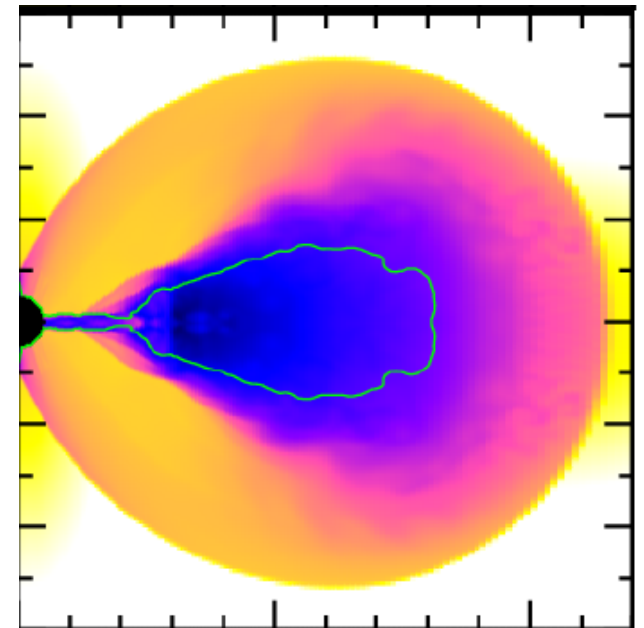
- Umeda & Nomoto (2008), Okubo et al. (2009)
- Simulations on going

- 超新星爆発との類似、Hypernova 成分

- ニュートリノ加熱はおこるか？ (YS & Takahashi in prep.)
- SASI (Standing Accretion Shock Instability) はおこるか？
  - Relax equatorial symmetry (Simulation on going)

- 対流の重要性

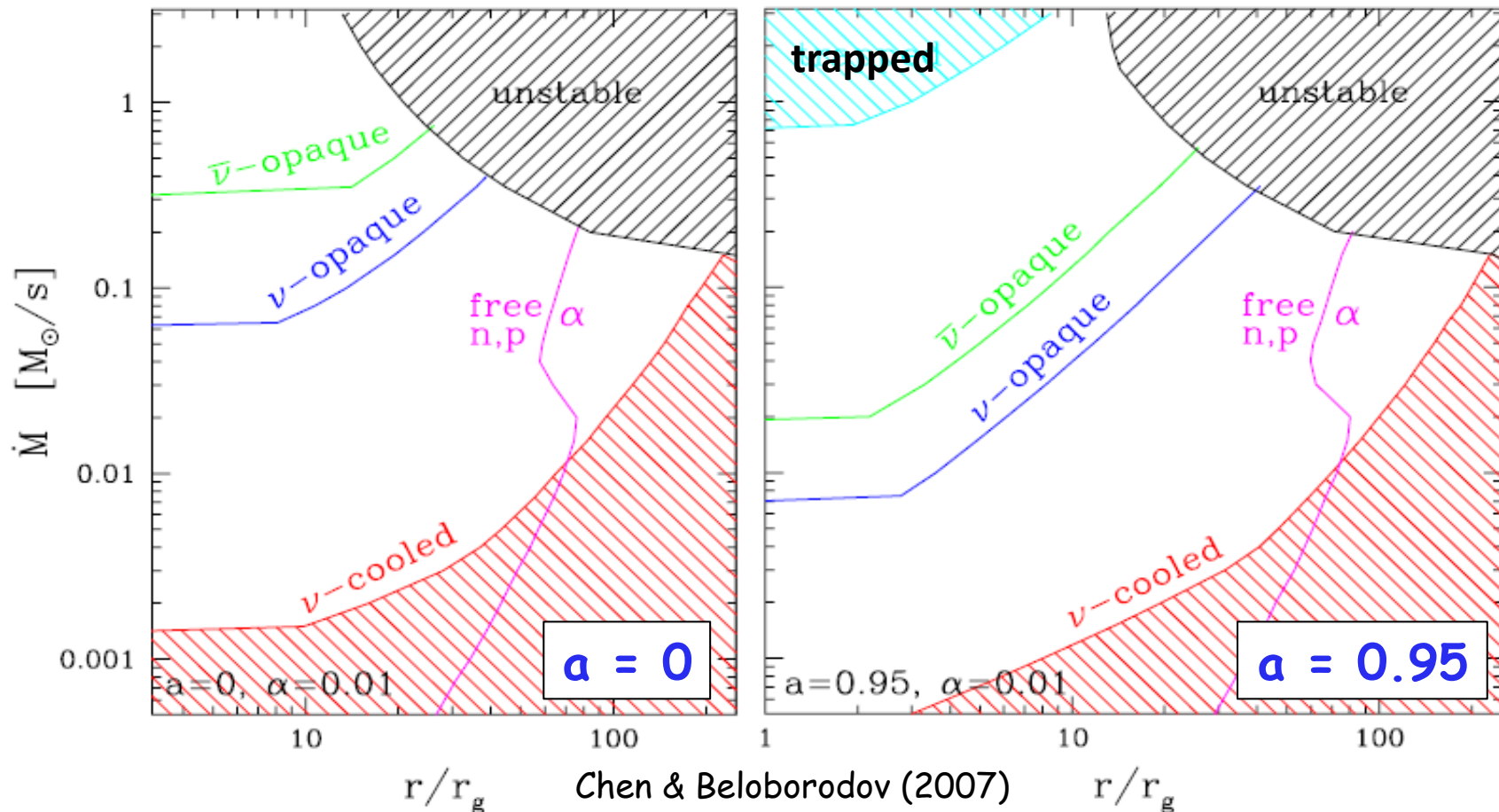
- Convection induced SN ?
- Milosavljevic et al. (2010)





# Importance of BH spin

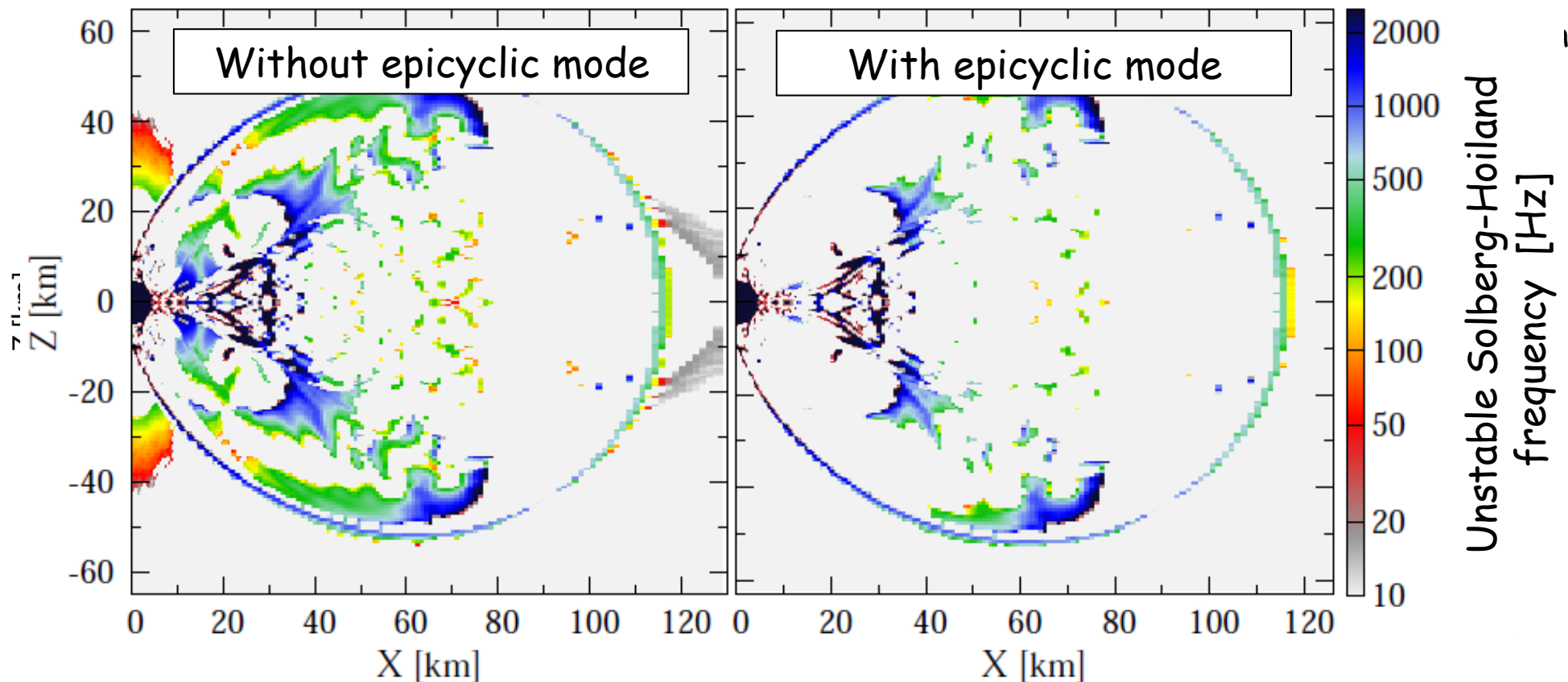
- Efficiency of exchange of gravitational binding energy :  $\sim 0.01$  ( $a=0$ )  $\Rightarrow \sim 0.4$  ( $a=1$ )
- Disk properties : no neutrino trapping for  $a=0$ 
  - Efficient cooling  $\Rightarrow$  no/very-weak negative entropy gradient
  - No convective activities, no time variability



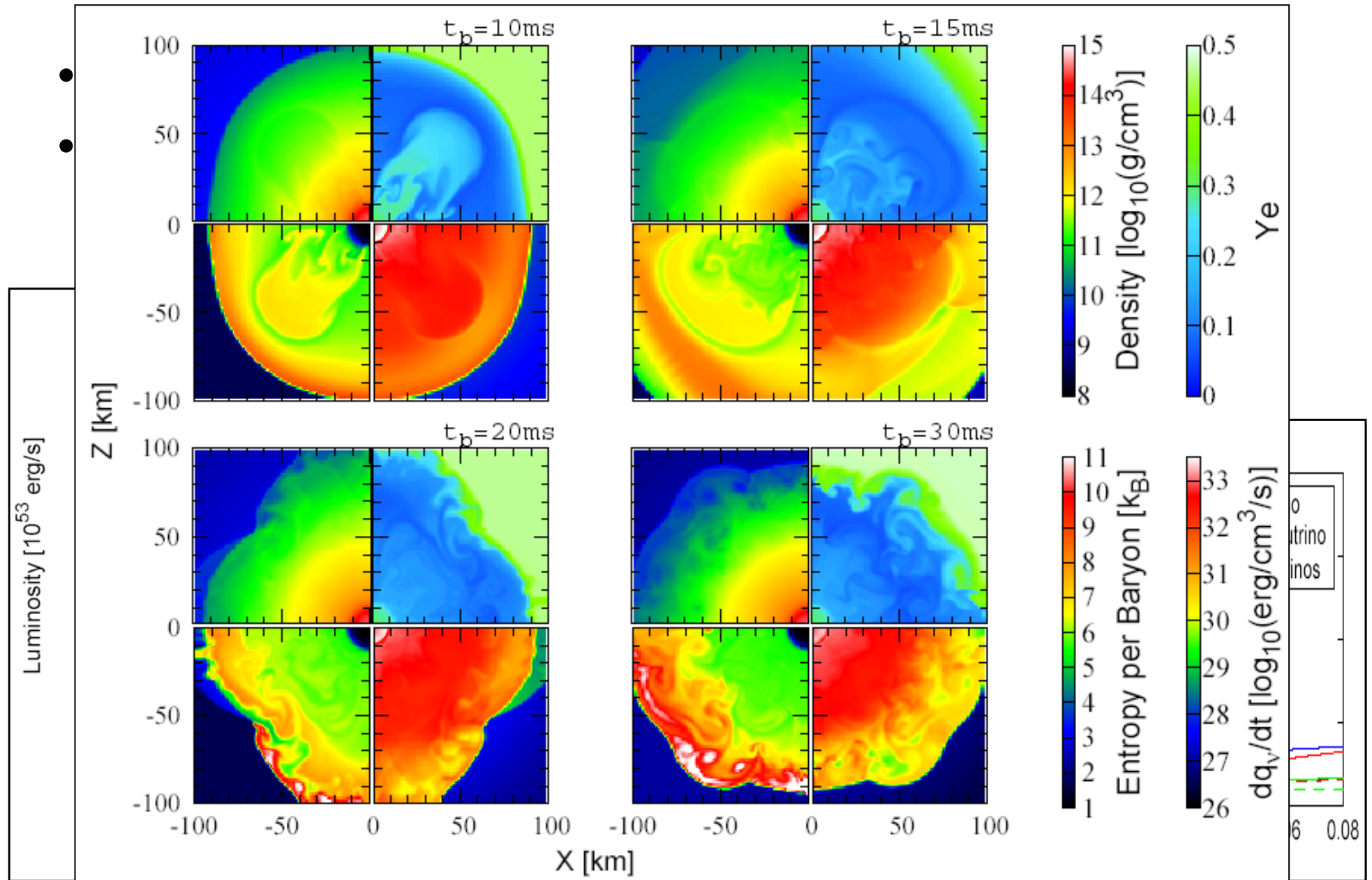


# Rapidly rotating model

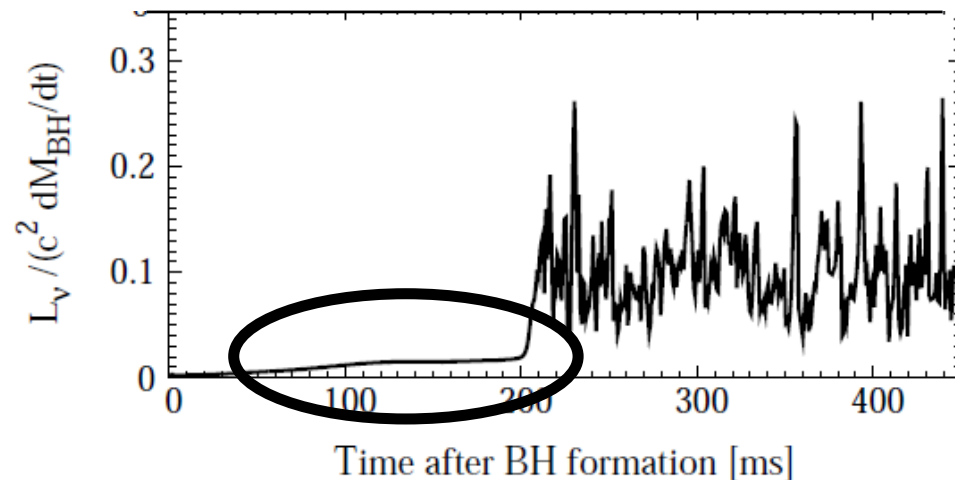
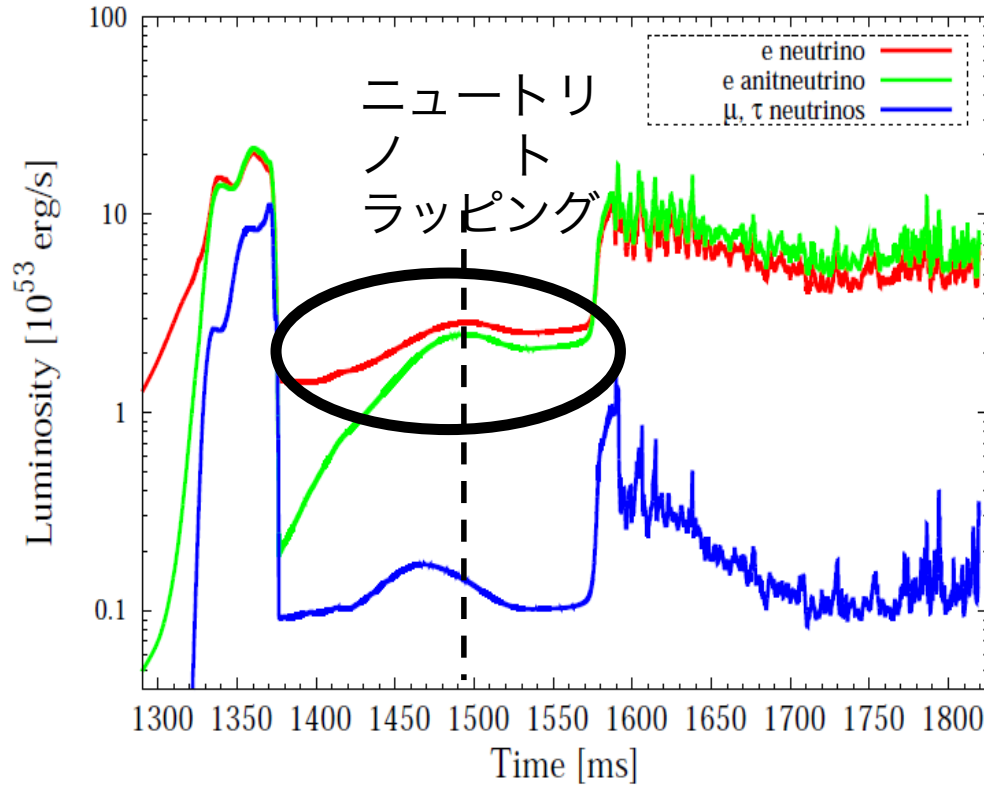
- Centrifugally supported, geometrically thick torus is immediately formed because of rapid rotation
- Copious neutrino emissions ( $\sim 10^{54}$  erg/s ) from the torus
- Convection is suppressed due to stabilizing epicyclic mode



# Code Validity (球对称崩壊)



# Neutrino luminosity (thin disk Phase)



- Thin disk phase  $\sim 10^{53}$  erg/s
  - 初め効率的なニュートリノ冷却

$$t_{\text{cool}} \left( \sim \frac{H\tau_\nu}{c} \right) < t_{\text{adv}} \left( \sim \frac{R}{v_{\text{adv}}} \sim \frac{R}{0.1c} \right)$$

for  $H \ll R$  and  $\tau_\nu = O(1)$

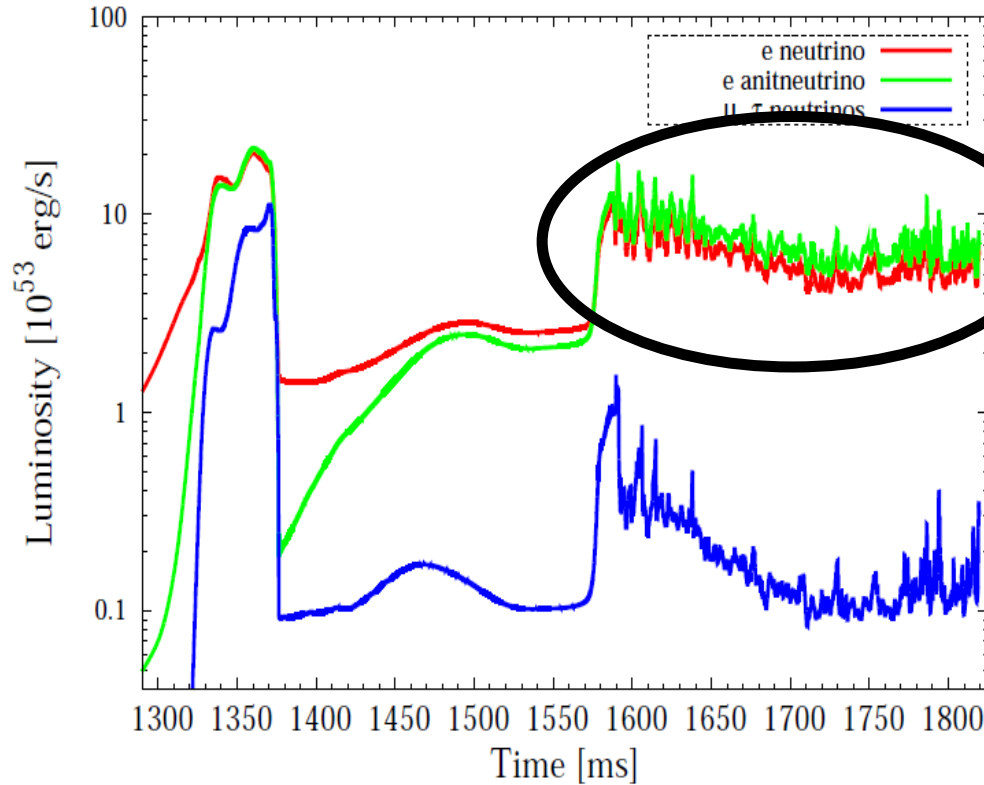
- 時間とともに密度が増大し  
ニュートリノがトラップされる

- efficiency は低い:  $\sim 10^{-3}$

- 円盤が小さく、衝撃波加熱を受ける物質の総量が小さいため
- 衝撃波での熱エネルギー生成率

$$\frac{GM_{BH}\dot{M}}{r} \sim 0.1\dot{M}c^2$$

# Neutrino luminosity (thick torus Phase)



- 高い光度  $\sim 10^{54}$  erg/s

- 冷却効率は中程度

$$t_{\text{cool}} \sim \frac{H\tau_v}{c} \sim t_{\text{adv}} \sim \frac{R}{v_{\text{adv}}} \sim \frac{R}{0.1c}$$

for  $H \sim R$  and  $\tau_v = O(10)$

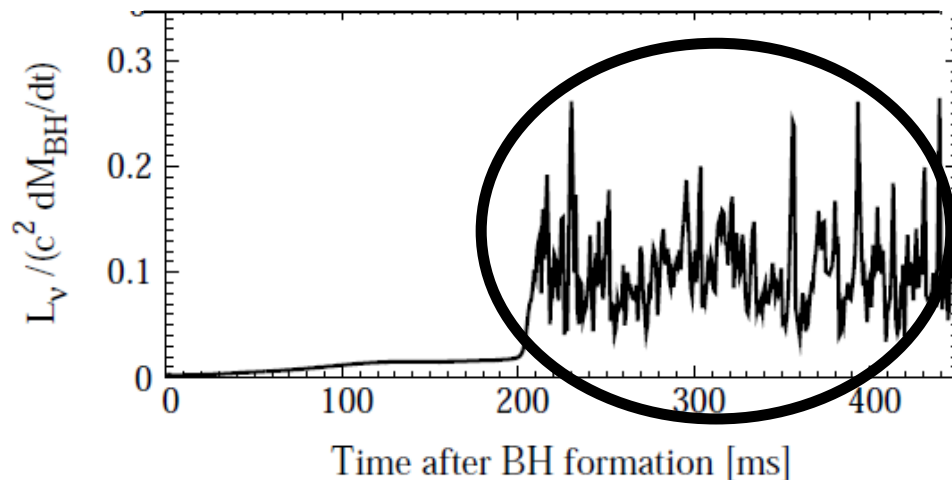
- 高い efficiency :  $\sim 10^{-1}$

- ほとんどの物質が滞在衝撃波において衝撃波加熱を経験

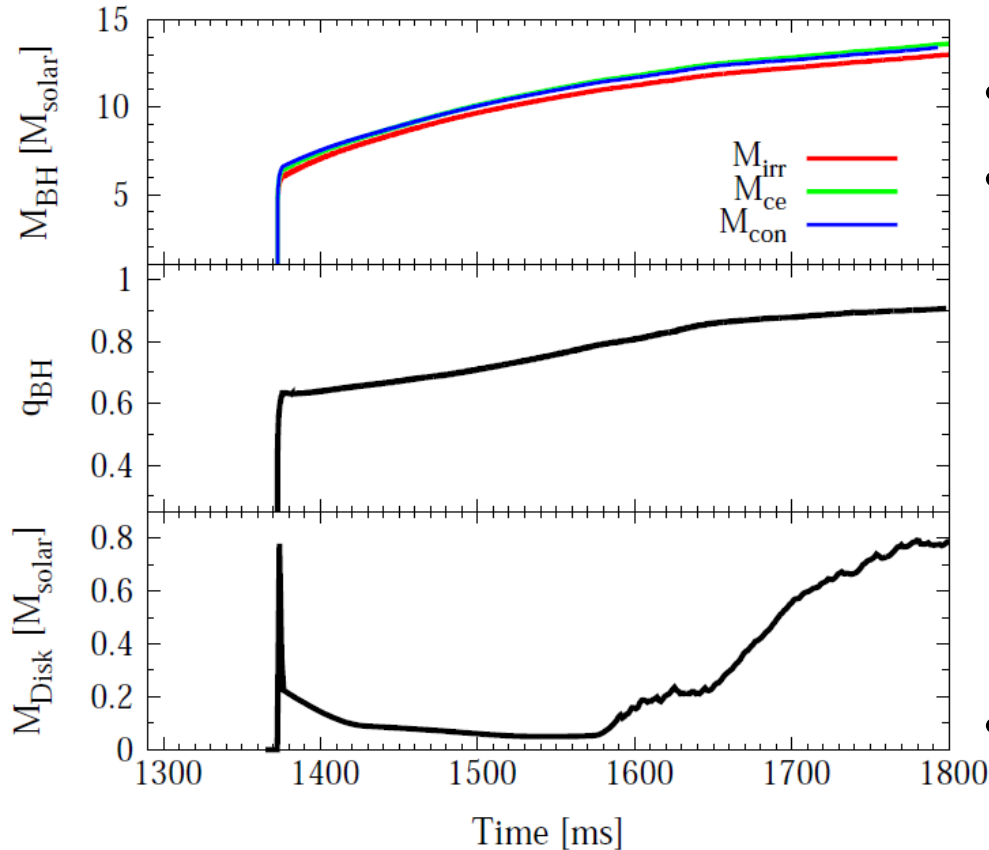
- 対流に伴う衝撃波

- BHスピンの効果がクリティカル

- 対流による激しい 時間変動



# BH(質量・スピン)と円盤(質量)の進化



- BH質量 : 6.5  $M_{\text{solar}}$   $\rightarrow$  14  $M_{\text{solar}}$

- BHスピン : 0.6  $\rightarrow$  0.9

- 対流発生にクリティカル

- スピン大  $\Rightarrow$  ISCO内側  $\Rightarrow$  密度大  $\Rightarrow$  光学的厚み大  $\Rightarrow$  冷却非効率  $\Rightarrow$  負のエントロピー勾配

- スピンゼロでは対流は起こらないと考えられる

- 円盤質量 :

- thin disk  $\sim$  0.1  $M_{\text{solar}}$

- thick torus  $\sim$  0.8  $M_{\text{solar}}$

- BH への質量降着率

- thin disk  $\sim$  20–40  $M_{\text{solar}}/\text{s}$

- convective torus  $\sim$  10  $M_{\text{solar}}/\text{s}$   
激しい時間変動

