

コラプサーモデルにおける ブラックホール・ディスク系の形成と進化

国立天文台 理論研究部
1月1日から基礎物理学研究所
関口 雄一郎

柴田 大 (京都大学)

Long GRB progenitor models

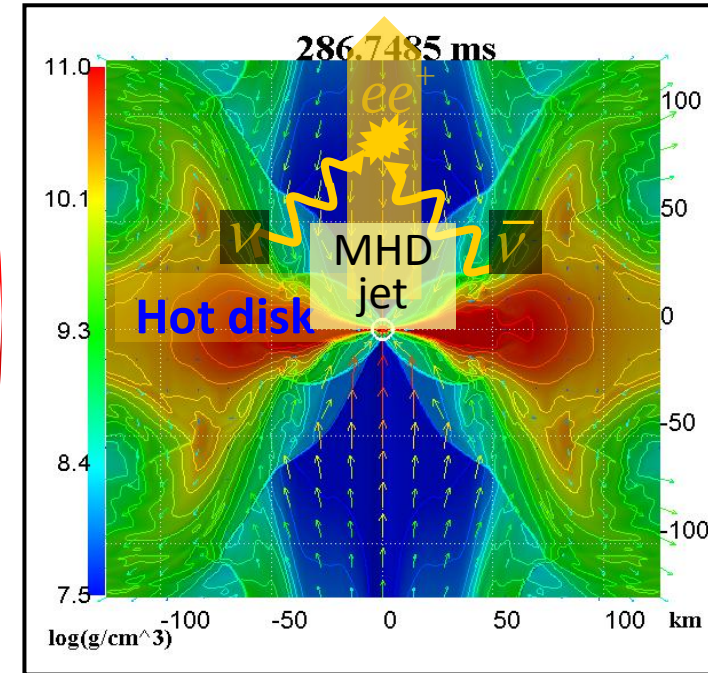
- 中心天体: BH + Disk (Collapsar)

- 高速回転(ディスク形成)が必要
- GRBエネルギー源
 - 外層の重力エネルギー $\Rightarrow$ ニュートリノ
 - BHの回転エネルギー $\Rightarrow$ Poynting flux

- Type-Ic SN の付随 (H, He外層なし)

- mass loss と同時に角運動量 loss
- BH が形成時に SN をおこせるのか？
 - ディスクからのニュートリノ風 (Woosley+2005)? 通常のSNすら難しいのに？
- 結局よくわかっていない

Sekiguchi & Shibata 2007



Long GRB progenitor models

- 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: 通常のSNの延長線上にある必要はない
 - He星合体モデル (Fryer & Heger 2005)
 - Tidal spin up モデル (van den Huevel & Yoon 2007)
 - Chemically homogeneous evolution (Woosley & Heger 2006, Yoon et al. 2006)
- いずれのモデルも親星コアでの強いmixingを伴う
 - 中心エントロピーが高くなる
- Low metallicity $\Rightarrow$ 星風による mass loss 小

- 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
 - 球対称: Nakazato et al. 2007, ニュートン重力、PopIII: Suwa et al. 2007

Motivation & Aim

- 近年の研究は、**GRB**の親星が通常の**SN**の親星と大きく異なることを示唆する(高エントロピーコア)
 - それほど認識されていない
- そのような親星の重力崩壊において、コアは密度・温度の相図上、通常の**SN**とは異なる領域を通る
 - ほとんど調べられていない
- 数値相対論シミュレーションによって以下を明らかにする
 - ダイナミクス
 - 形成される**BH**の物理量 (C.f. スピン $\Leftrightarrow$ **GRB jet** の Poynting flux)
 - 形成される降着円盤の熱力学構造
 - 放射されるニュートリノの光度 ($\Leftrightarrow$ ニュートリノモデル)

基礎方程式と微視的物理

- Einstein 方程式 (Shibata-Nakamura, BSSN)

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

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

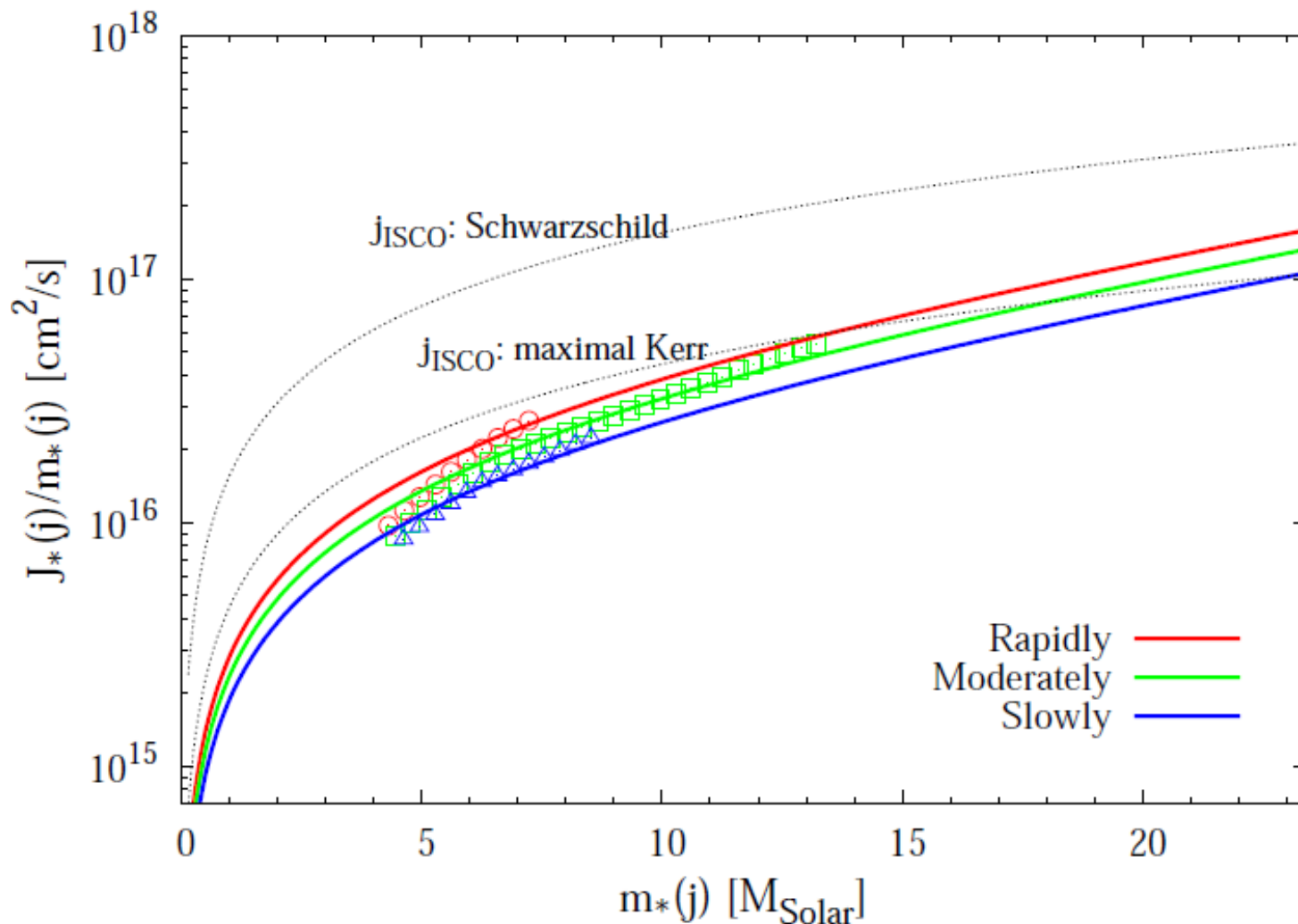
$$(\partial_t - \beta^k \partial_k) K = -D^k D_k \alpha + \left[\tilde{A}_{ij} \tilde{A}^{ij} + \frac{1}{3} K^2 \right] + 4\pi\alpha(\rho_h + S)$$

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

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

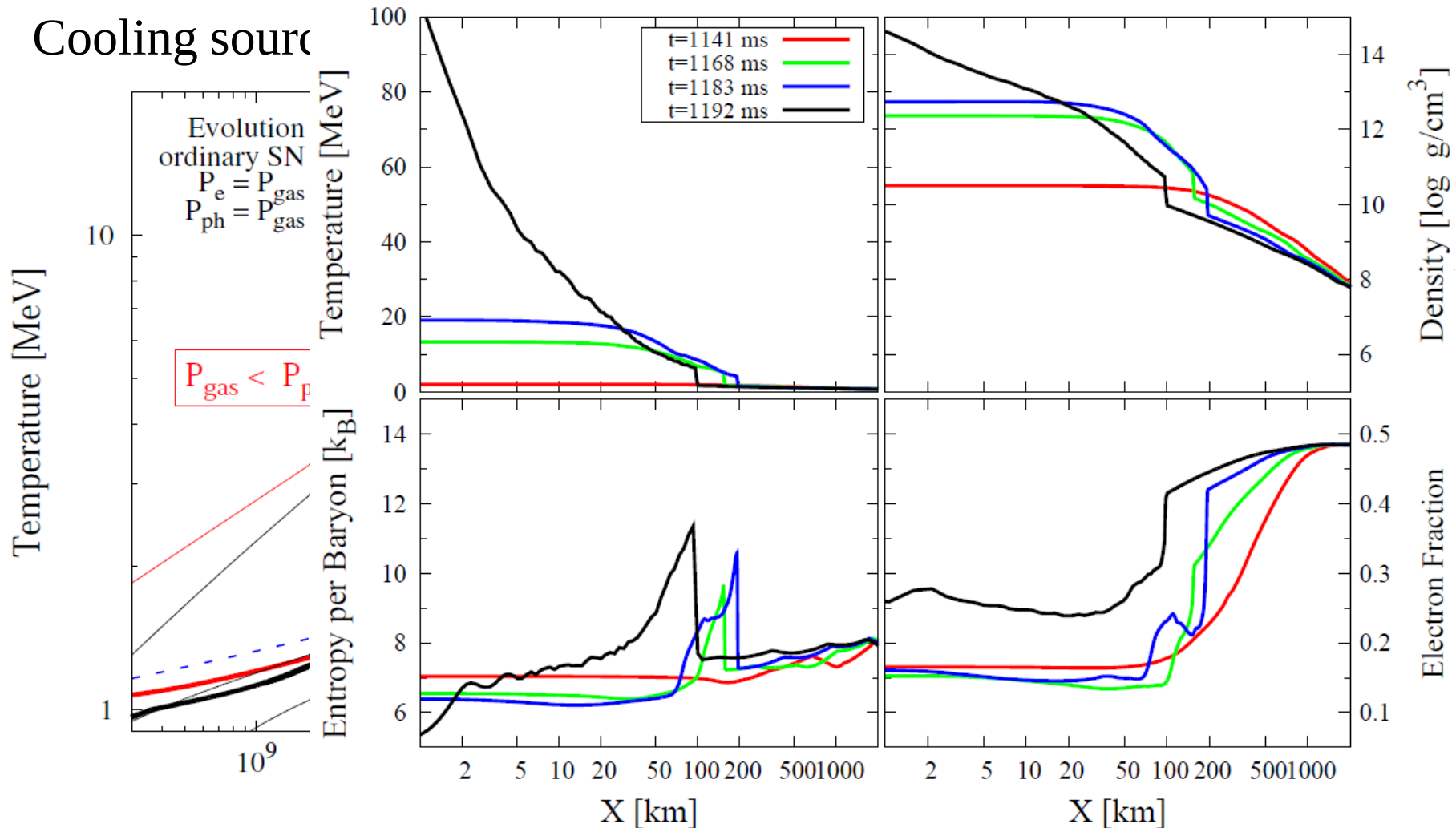
初期条件

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

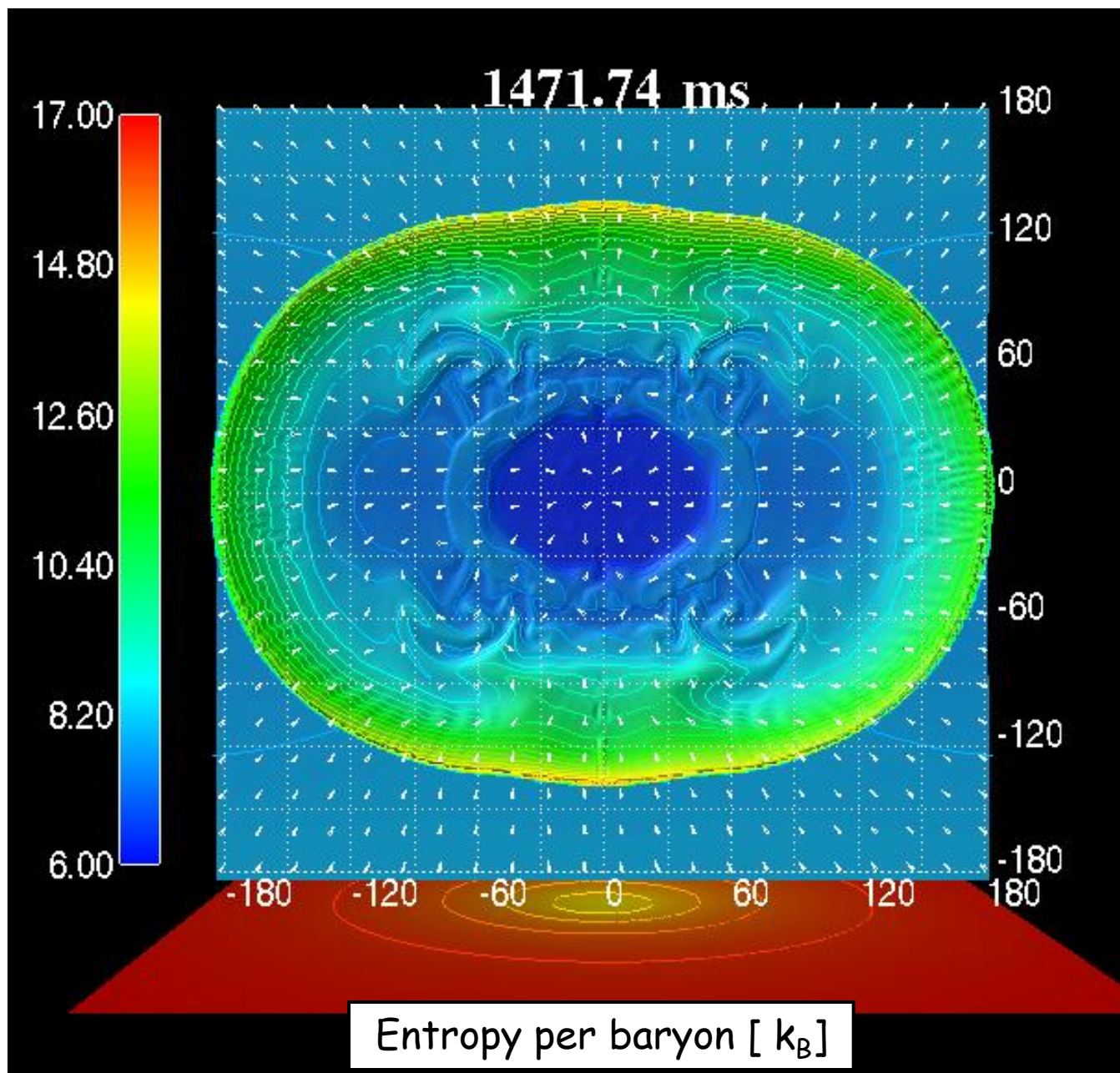


進化経路

- 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 (c.f. Nakazato et al, Suwa et al)
- Cooling source

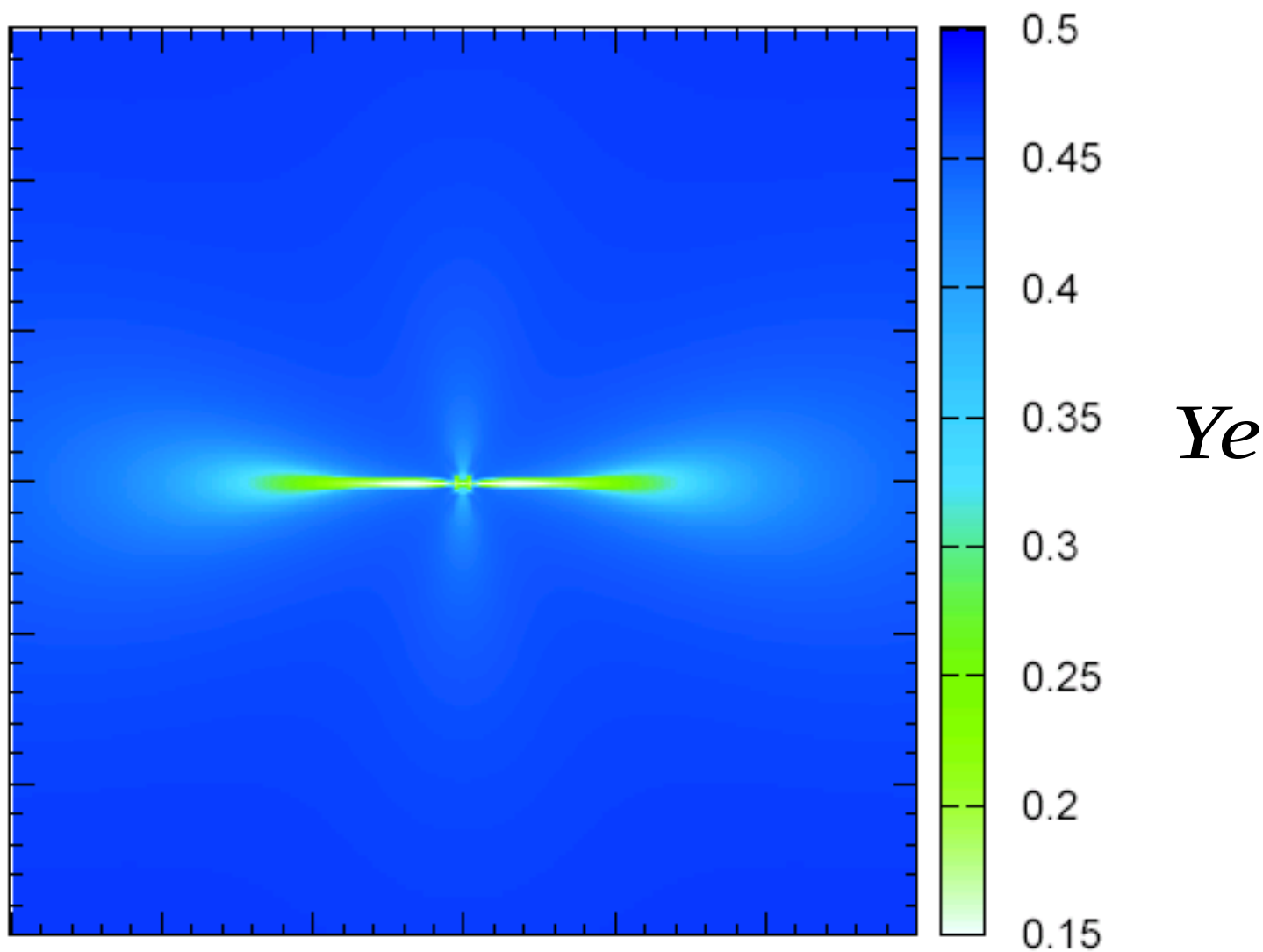


ダイナミクス：高速回転モデル

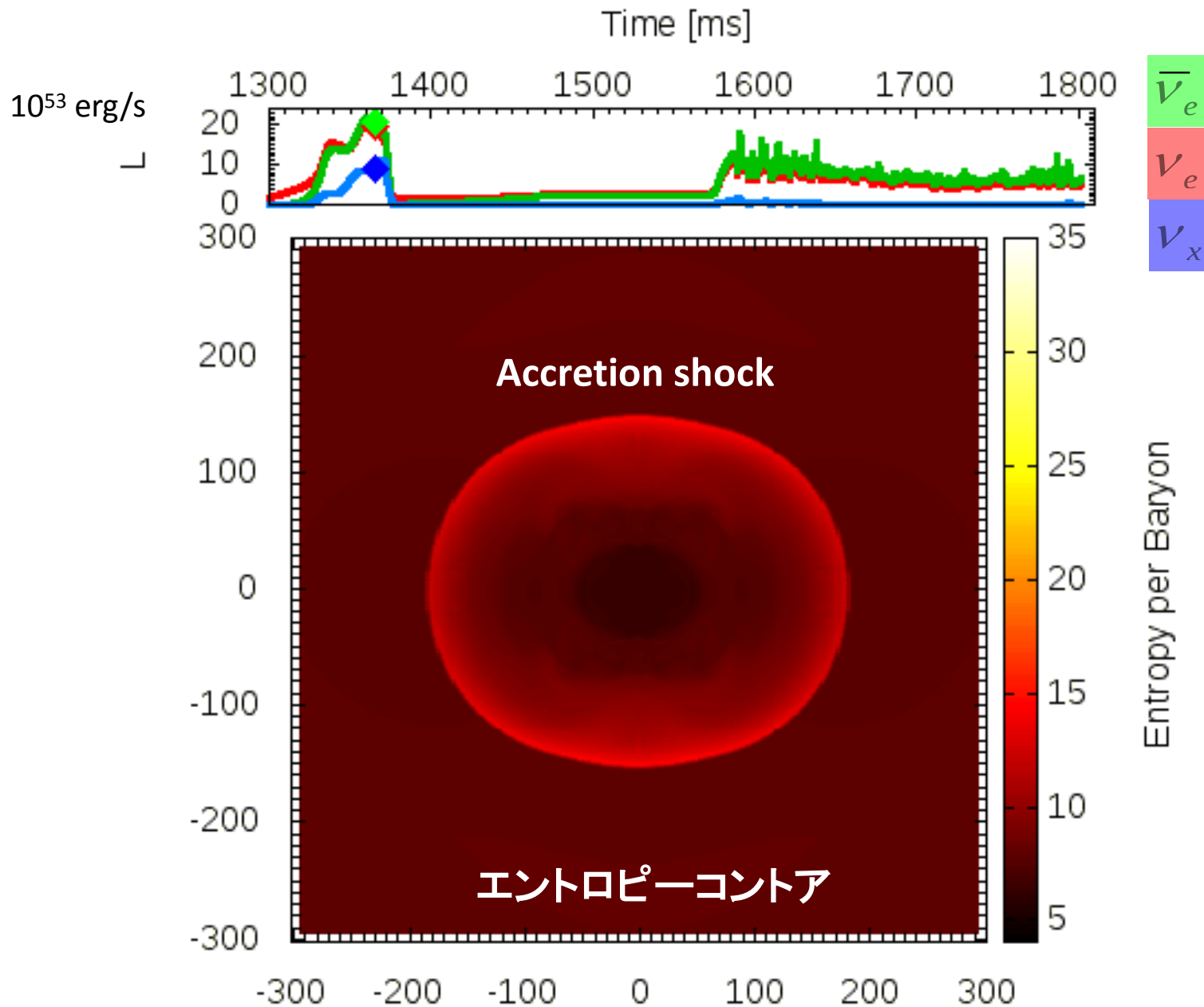


ダイナミクス：低速回転モデル

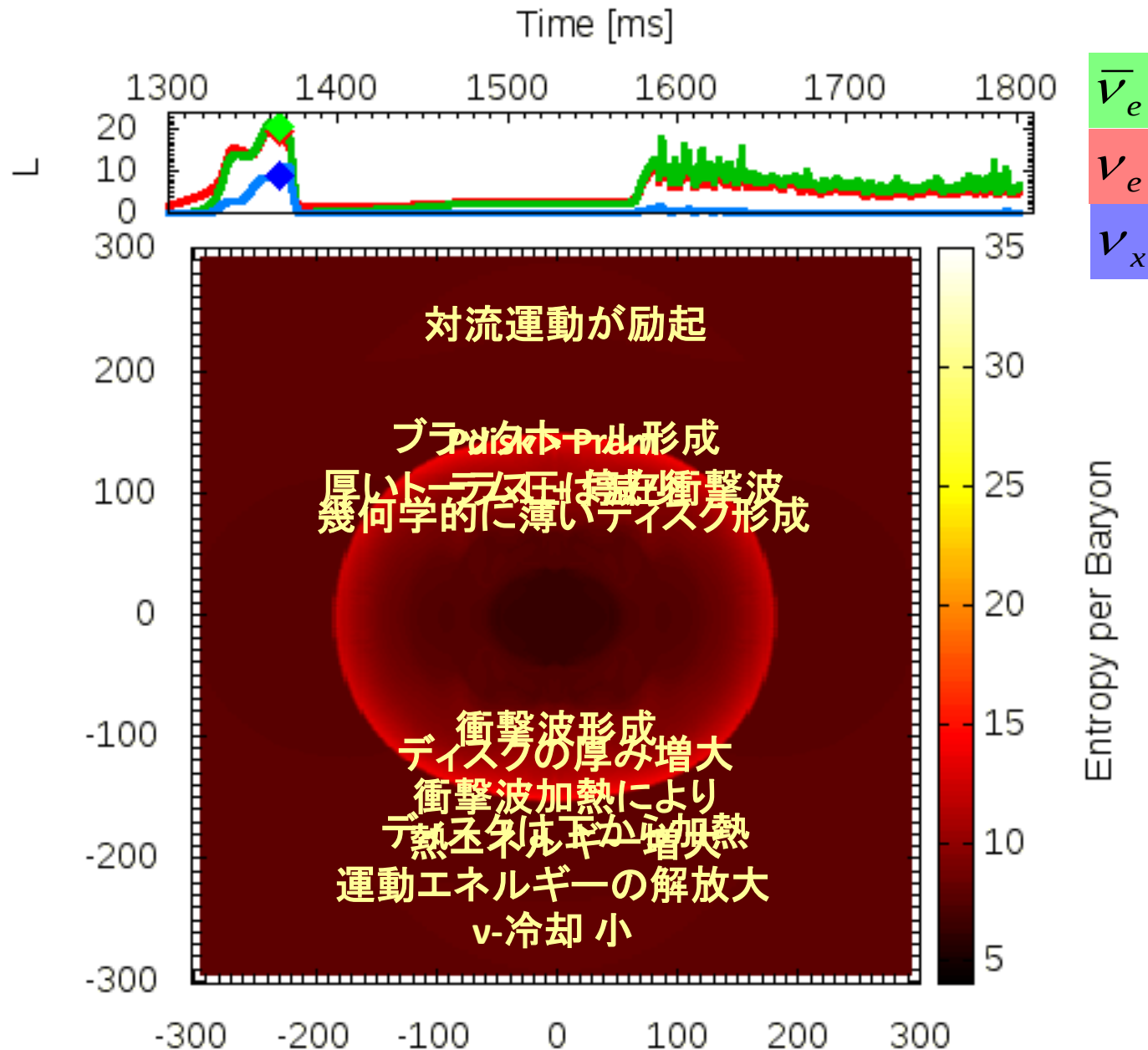
幾何学的に薄いディスクが形成され、計算時間内ではそのまま



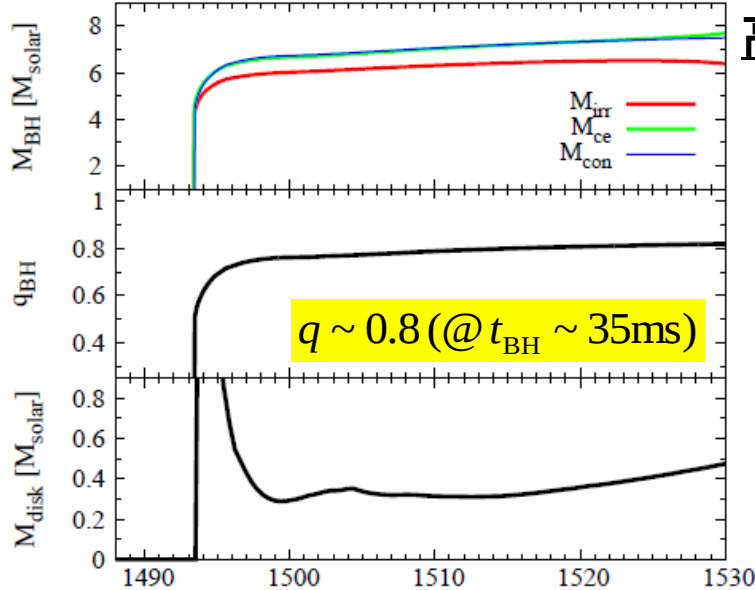
ダイナミクス：中程度回転モデル



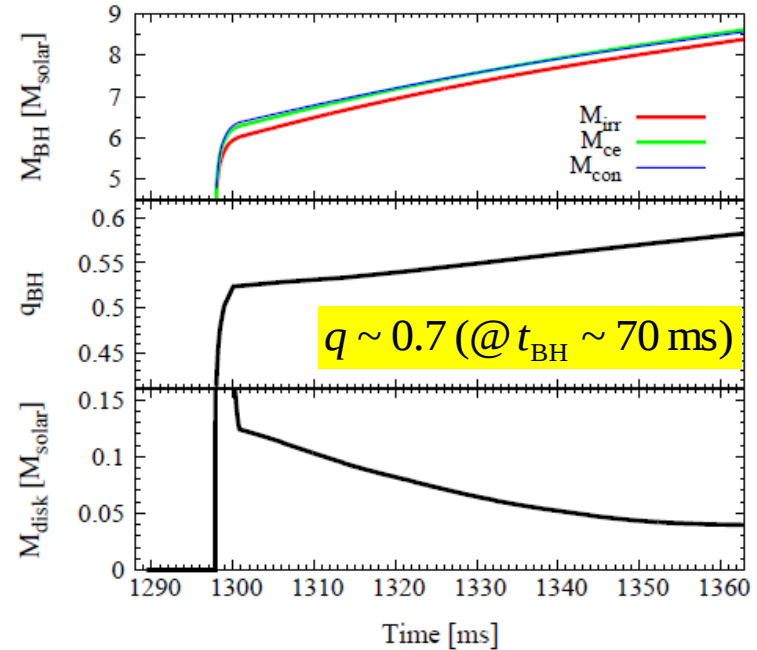
ダイナミクス：中程度回転モデル



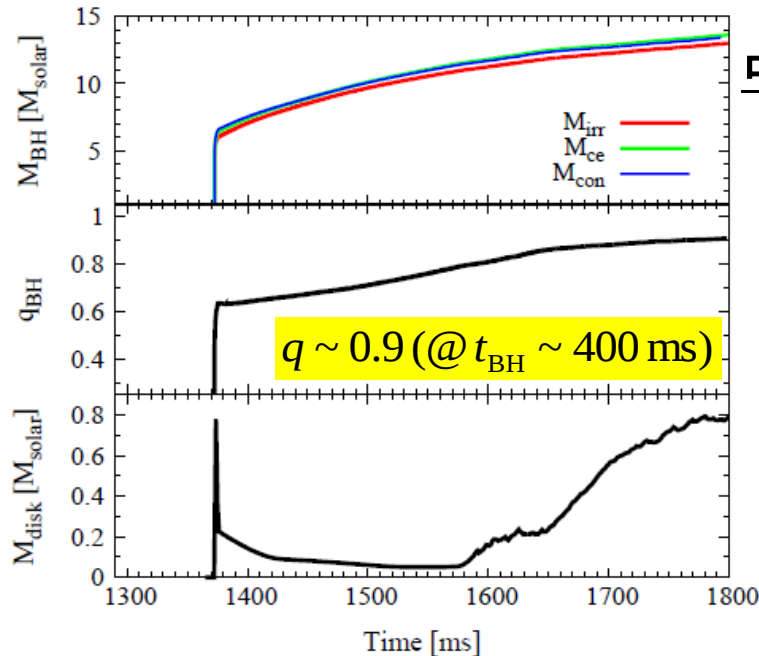
BH mass, spin, & Disk mass



高速



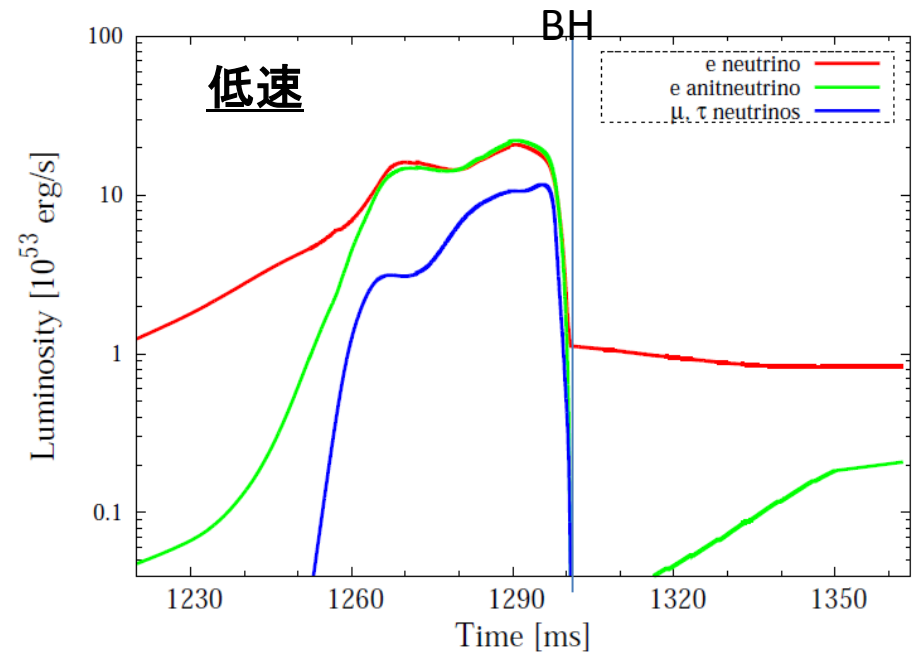
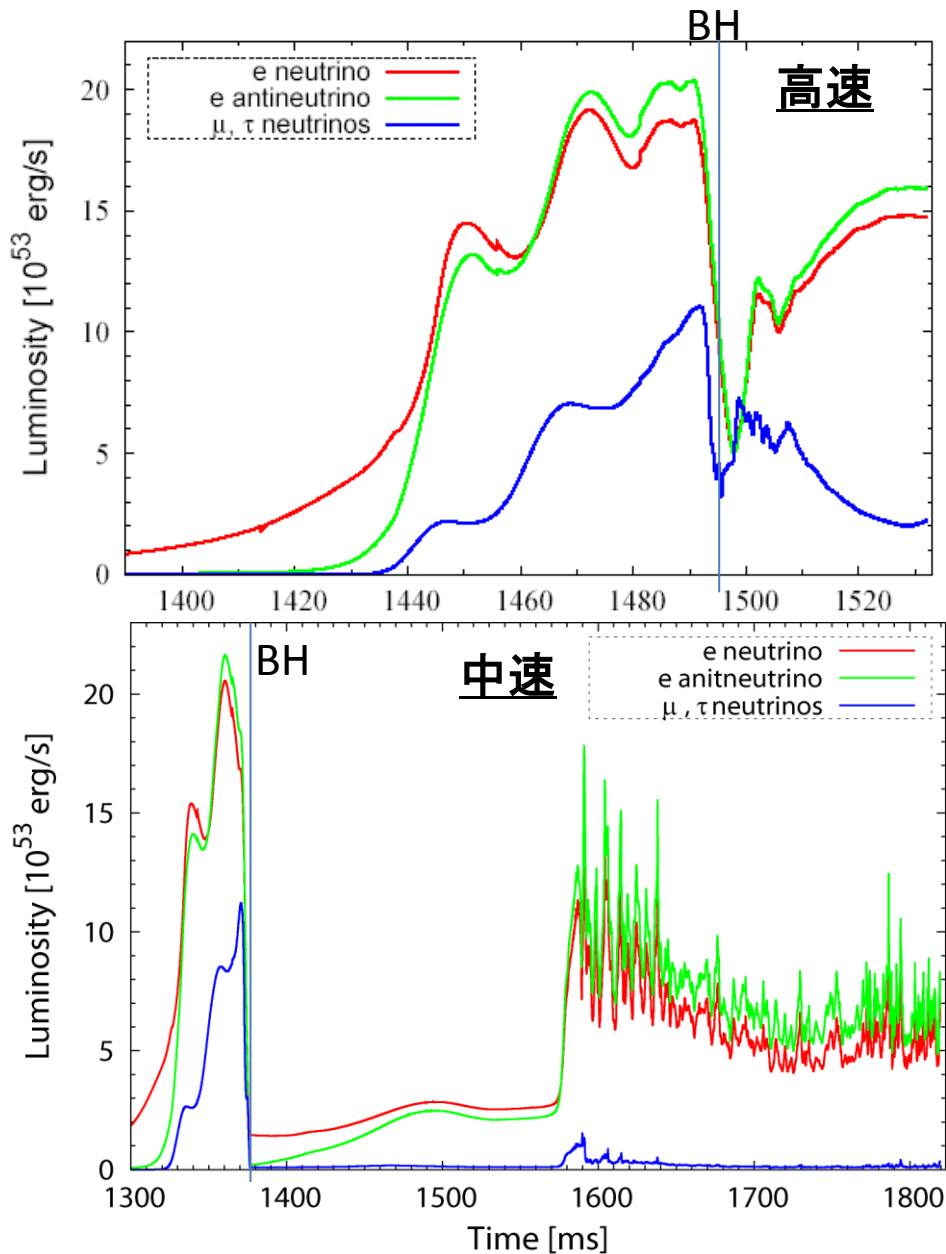
低速



中速

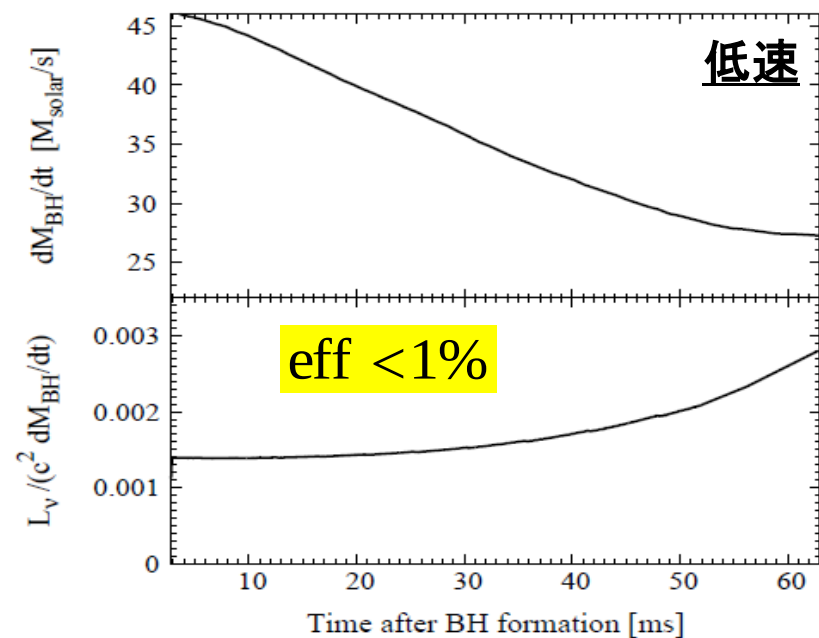
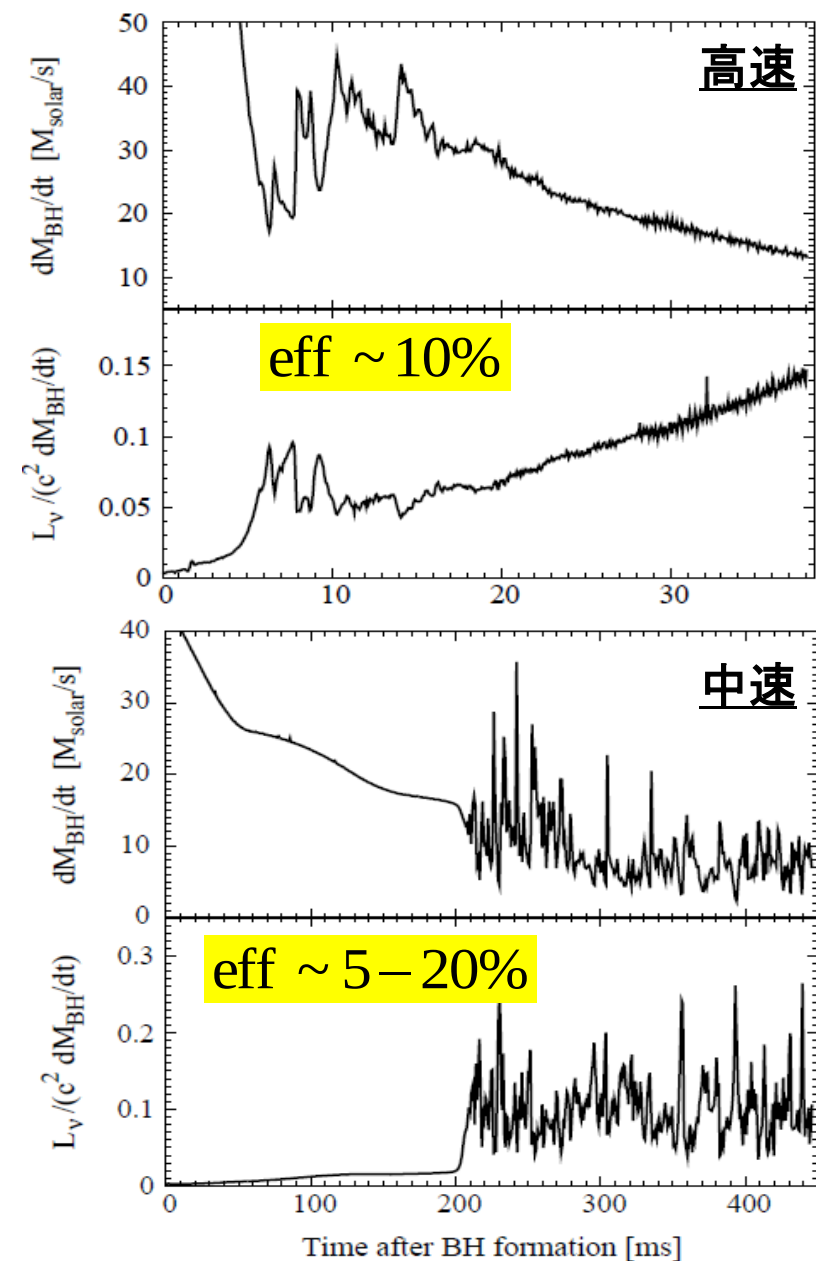
- BH spin $\sim 0.7-0.9$
 - シュヴァルツシルト BH ではない
- BH spin の GR効果は無視できない
 - Disk 構造、ニュートリノ光度に影響
- $E_{\text{BHspin}} \sim 0.07-0.09 M_{\text{BH}} c^2$

ニュートリノ光度



- $L \sim 10^{53-54}$ erg/s
- BH 形成とともに ν sphere が飲み込まれて光度低下
- $\Rightarrow$ Disk からの放射
- 中速回転モデルでは対流に伴う時間変動がみられる

BH質量降着率、変換効率



- 中・高速回転モデルで高効率～10%
 - トーラス、停在衝撃波の形成が重要
 - BHに飲み込まれる前に衝撃波で運動エネルギー解放
 - 幾何学的断面積大
- 中速回転モデル: 激しい時間変動
- 高速回転モデル: 弱い時間変動

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

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

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

- $L_{\text{pair}} \propto (\dot{M})^{9/4} \Rightarrow$ 高次依存性: 初期段階

- BZ 過程によるポインティングフラックス生成

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

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

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

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

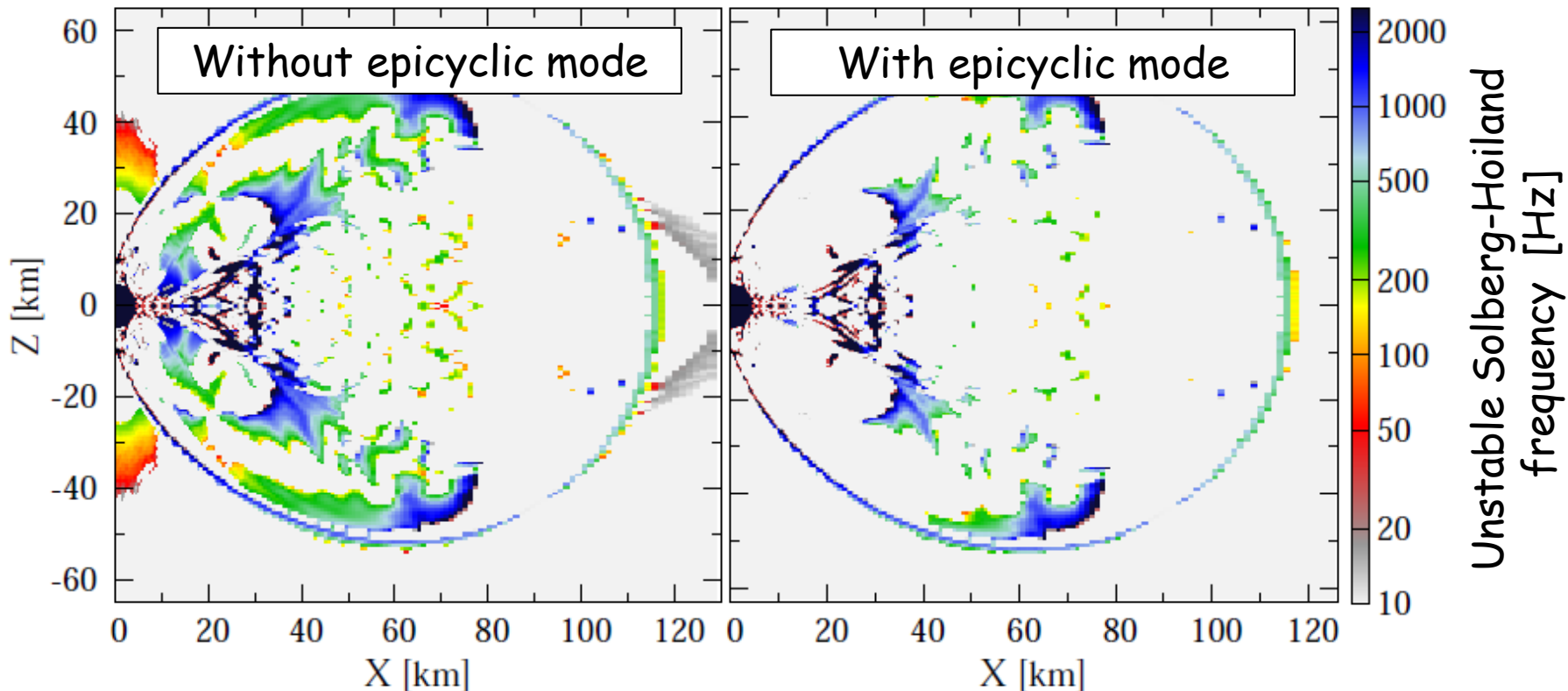
- $L_{\text{BZ}} \propto (\dot{M})^1 \Rightarrow$ 低次依存性: 後期段階

Discussions

- 対流不安定の回転依存性
- ダイナミクスの BH spin 依存性
- 超新星爆発との類似

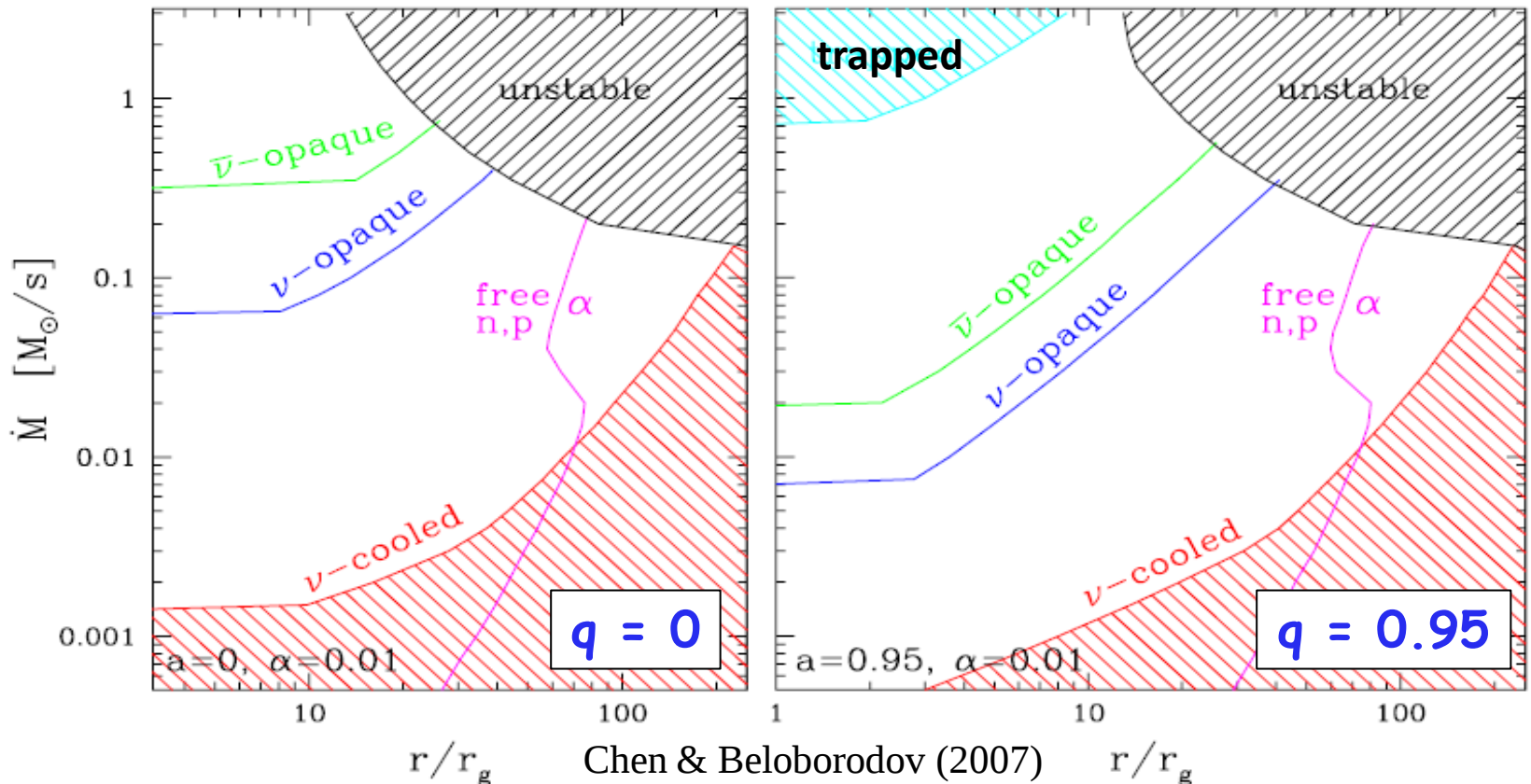
対流について

- 対流不安定条件: $N_{SH}^2 = N_{BV}^2 + \kappa^2 < 0$
 - Brunt-Baisala frequency: $N_{BV}^2 = \frac{g_{\text{eff}}}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_{s, Y_l} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial s} \right)_{\rho, Y_l} \left(\frac{ds}{dr} \right) + \left(\frac{\partial P}{\partial Y_l} \right)_{\rho, s} \left(\frac{dY_l}{dr} \right) \right]$
 - Epicyclic frequency > 0 : $\kappa^2 = \varpi \frac{d\Omega^2}{d\varpi} + 4\Omega^2$
- 高速回転モデルでは、epicyclic mode により対流が安定化



BH spin とダイナミクス

- 重力エネルギーの解放効率 : 0.01 ($q=0$) $\Rightarrow \sim 0.4$ ($q=1$)
- ディスク構造を介したニュートリノ反応特性 :
 - Very efficient cooling $\Rightarrow$ no/very-weak negative entropy gradient
 - No convective activities, no time variability ? 分解能も重要 ! !

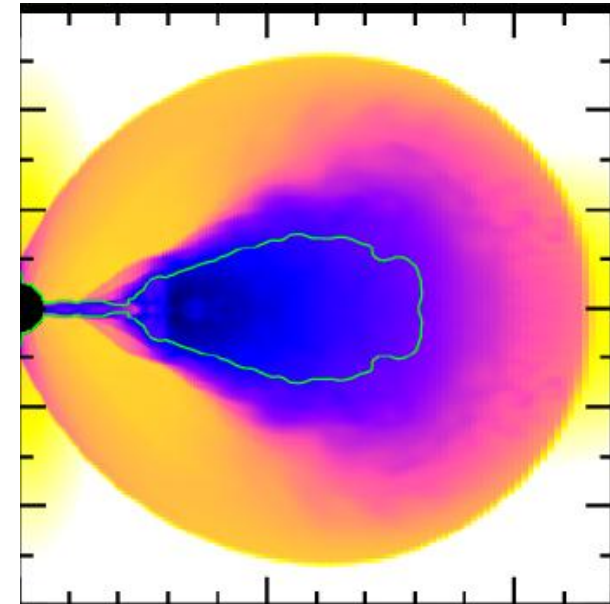


分解能の重要性

- 幾何学的に薄い円盤をきちんと分解しないと、円盤がなくなってしまう
- 分解能が足りないとトーラスへの膨張が起こらない
 - 十分な分解能がなければ、グリッド幅を $1/2$ にしても変わらない
 - c.f. MRI
- コラプサー初期段階では $P_{\text{ram}} \sim P_{\text{disk}}$
 - 極めて pressure scale height が小さい

超新星爆発との類似

- 降着衝撃波形成という観点からは、違うのはトポロジーだけ
 - 1. ニュートリノ加熱はおこるか？ (YS & Takahashi in prep.)
 - 衝撃波面と、ニュートリノ‘トラス’の間で加熱が卓越していればよい
 - 2. **SASI (Standing Accretion Shock Instability)** はおこるか？
 - そもそも SASI はブラックホール周りの降着流で発見された！
 - Relax equatorial symmetry (Simulation on going)
- 高エントロピーによる特典
 - 重元素が少ない
 - 主衝撃波冷却源は光分解
 - Fe の場合 : 10^{51} erg per $0.1 M_{\text{solar}}$
 - 高い質量降着率 ($\Leftrightarrow$ ラム圧)
- Convection-aided SN ? (Milosavljevic+ 2010)
 - Convective luminosity は十分



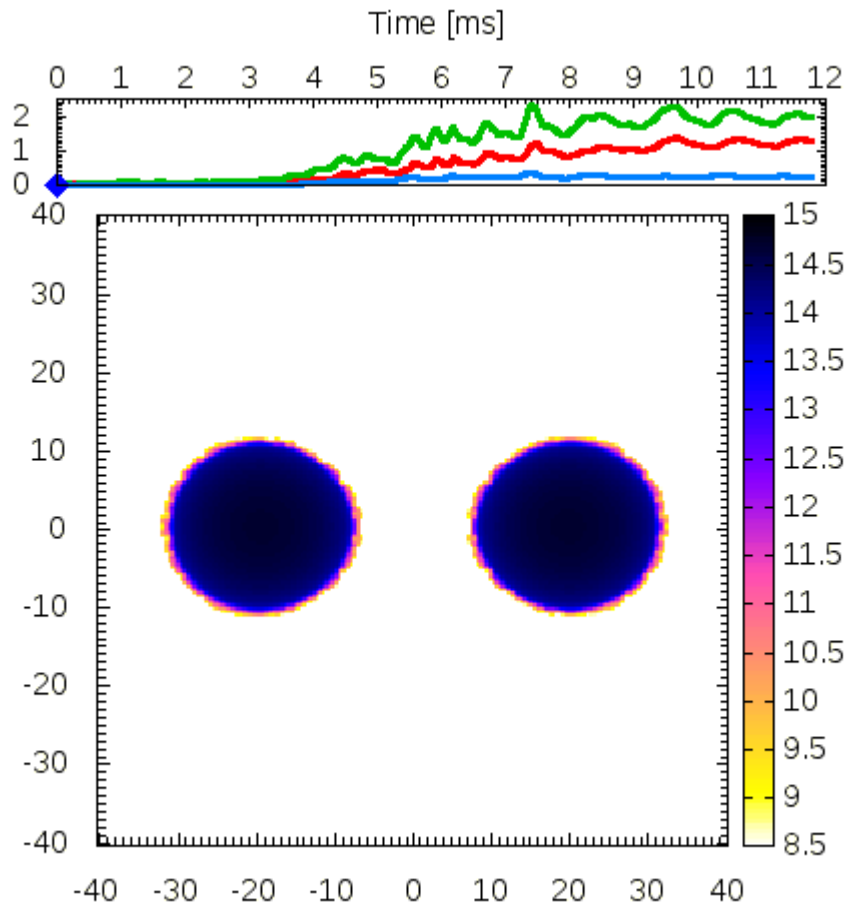
Summary

- 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 $\Rightarrow$ 後期にトーラス?
 - 中速回転: thin disk $\Rightarrow$ 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 $\Rightarrow$ 激しく時間変動するニュートリノ光度、($\dot{M}$)
 - GRBの時間変動をもたらさうる

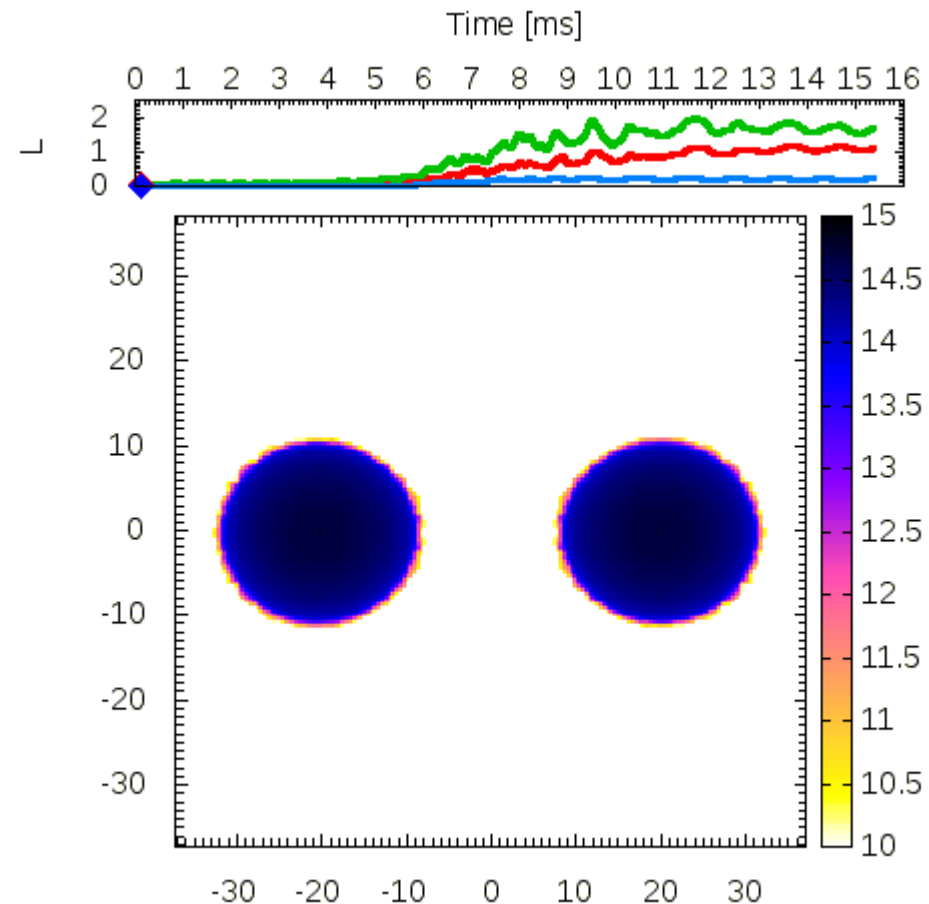
BNS merger

一般相対論特有の座標(ゲージ)自由度に起因した問題点の克服

悪いゲージ



良いゲージ



GRB related observations

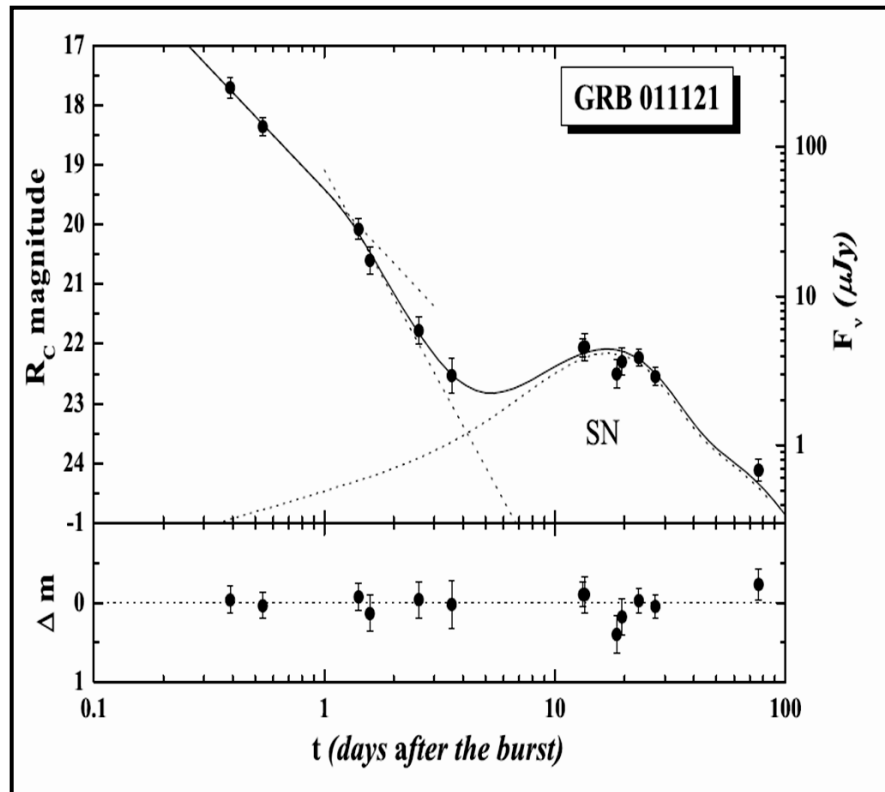
- Association with SN
 - 少なくとも一部のGRBに超新星爆発が付随
 - 付随する超新星はほとんど Ic 型
 - より高エネルギーの超新星(Hypernova)
 - 爆発は非球対称
- Environment observations
 - GRB は低金属量環境を好むようにみえる
 - 母銀河の morphology (Frucher + 2006, 2010)
 - GRB hosts : small, irregular, faint galaxies
 - Type Ic SN hosts : brighter, (usually) spiral galaxies
 - Indirect evidence but sufficient statistics
 - Metallicity estimates (Modjaz + 2008)
 - Small samples but direct evidence

Association of GRB with SNe

残光中の Hump

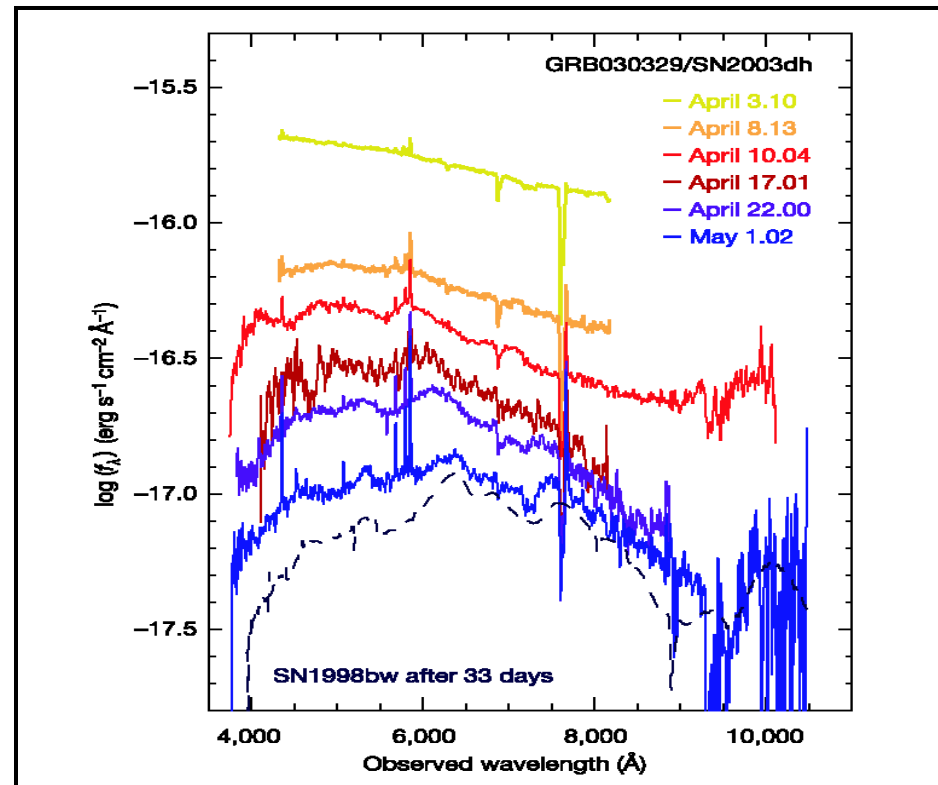
$Z < 0.7$ のGRBに見られる

Zeh et al. 2004



残光スペクトル中の SN成分

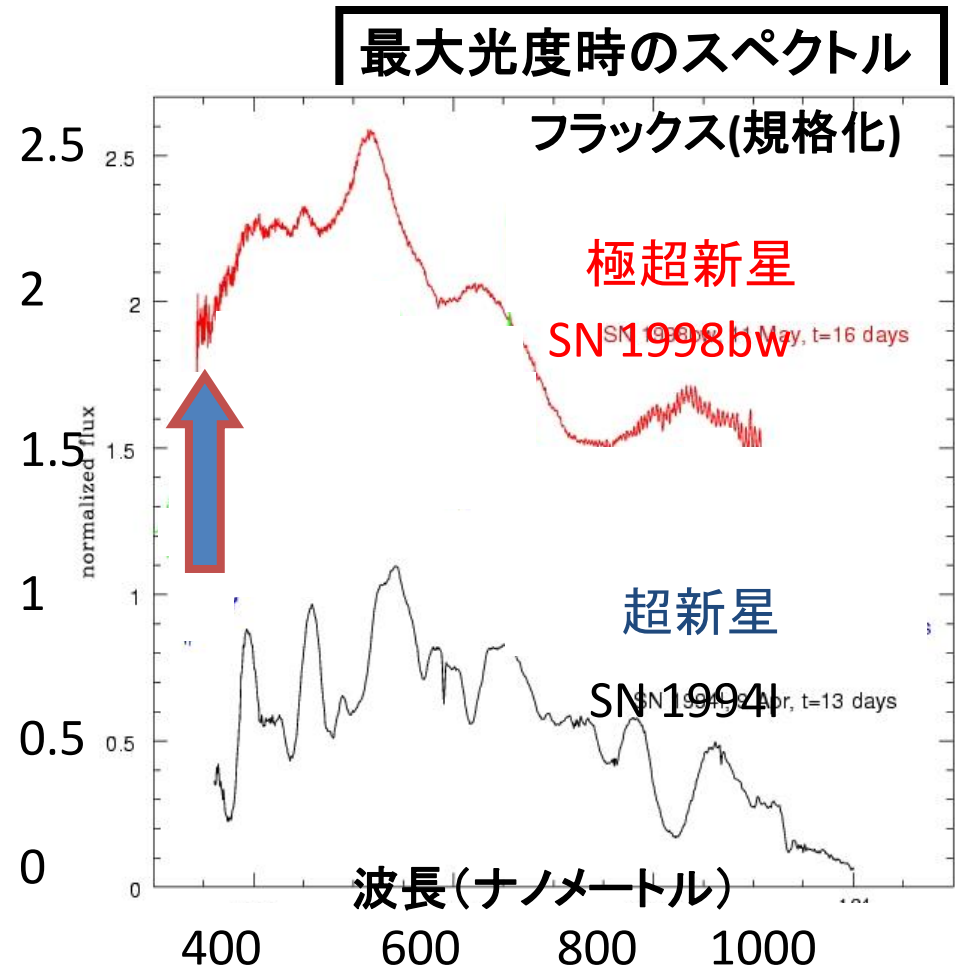
Hijorth et al. 2003



Hypernova association

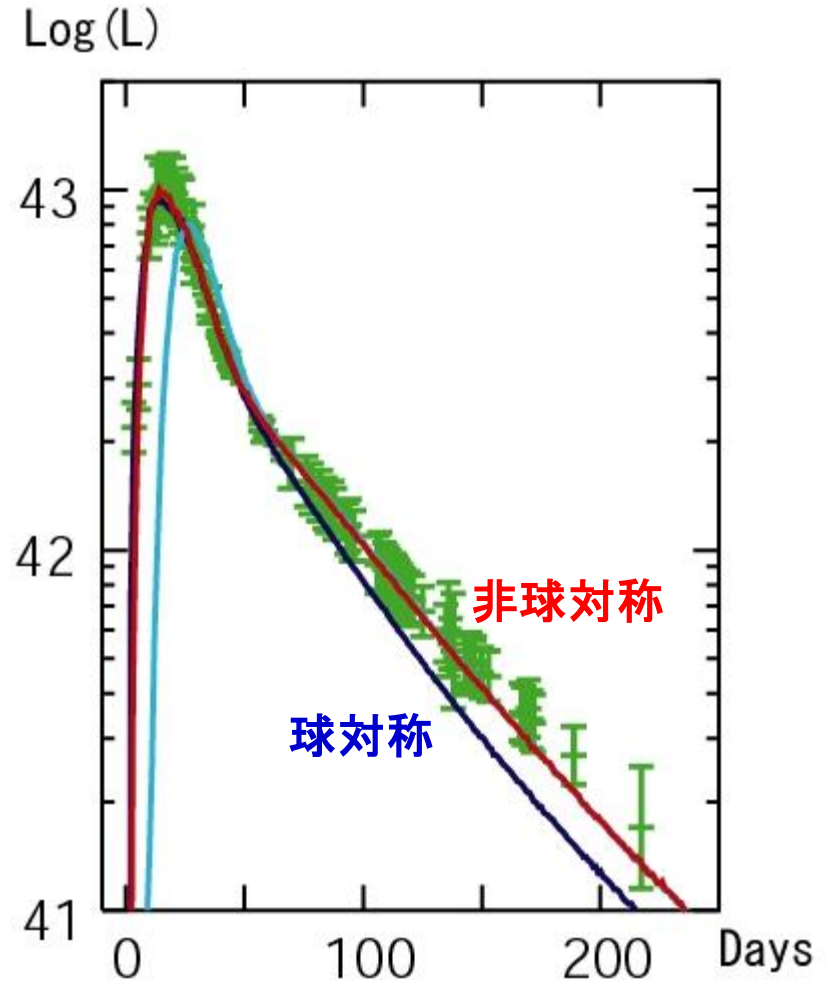
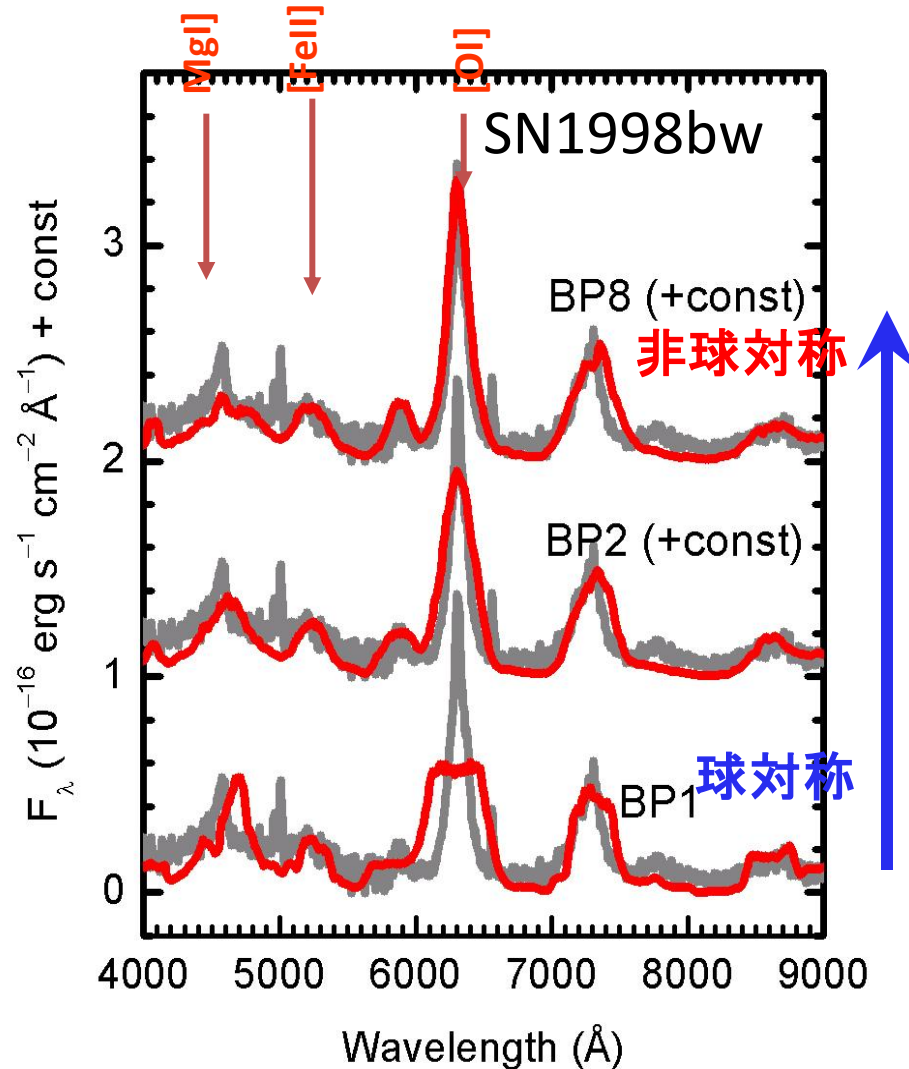
- γ 線バーストに伴う超新星
 - 付随する超新星はエネルギーが大きく明るい
 - SN1998bw: 40太陽質量
 $E > \sim 10^{52}$ erg

Galama et al. (1998); Iwamoto et al. (1998)



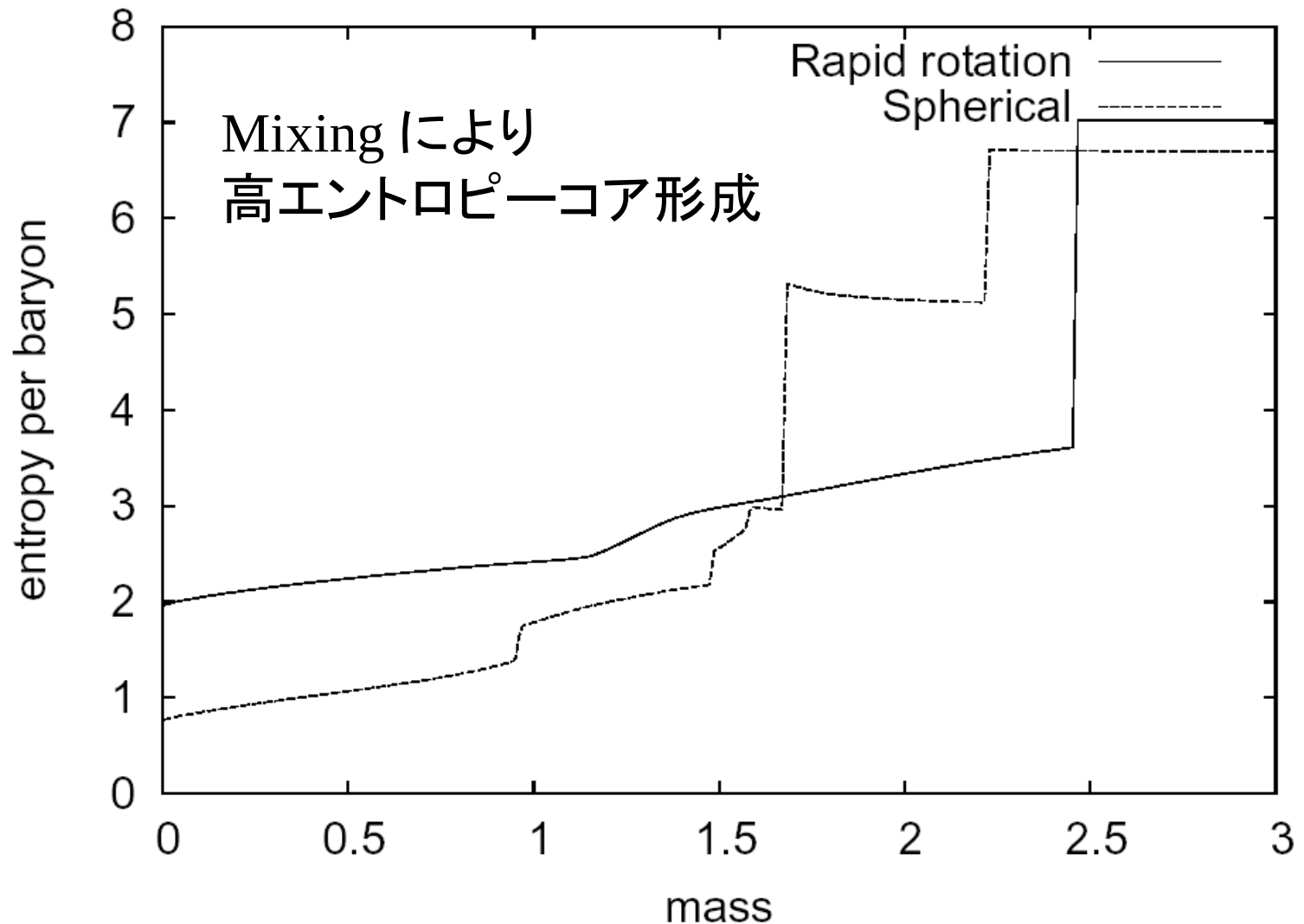
非球对称爆発

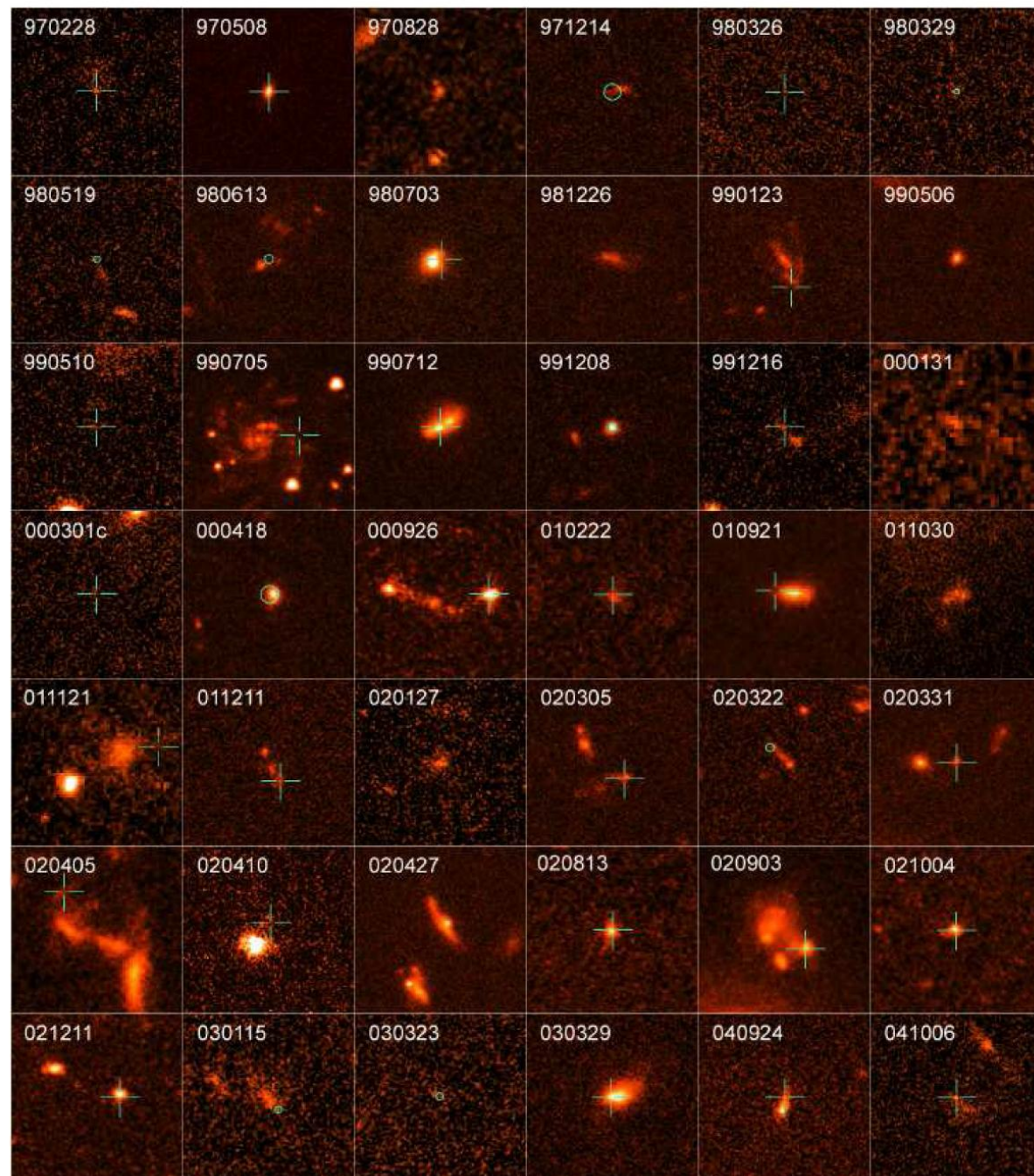
Maeda et al. 2002, Maeda et al. 2005



Mixing $\Rightarrow$ s/k 大

Woosley & Heger (2006)

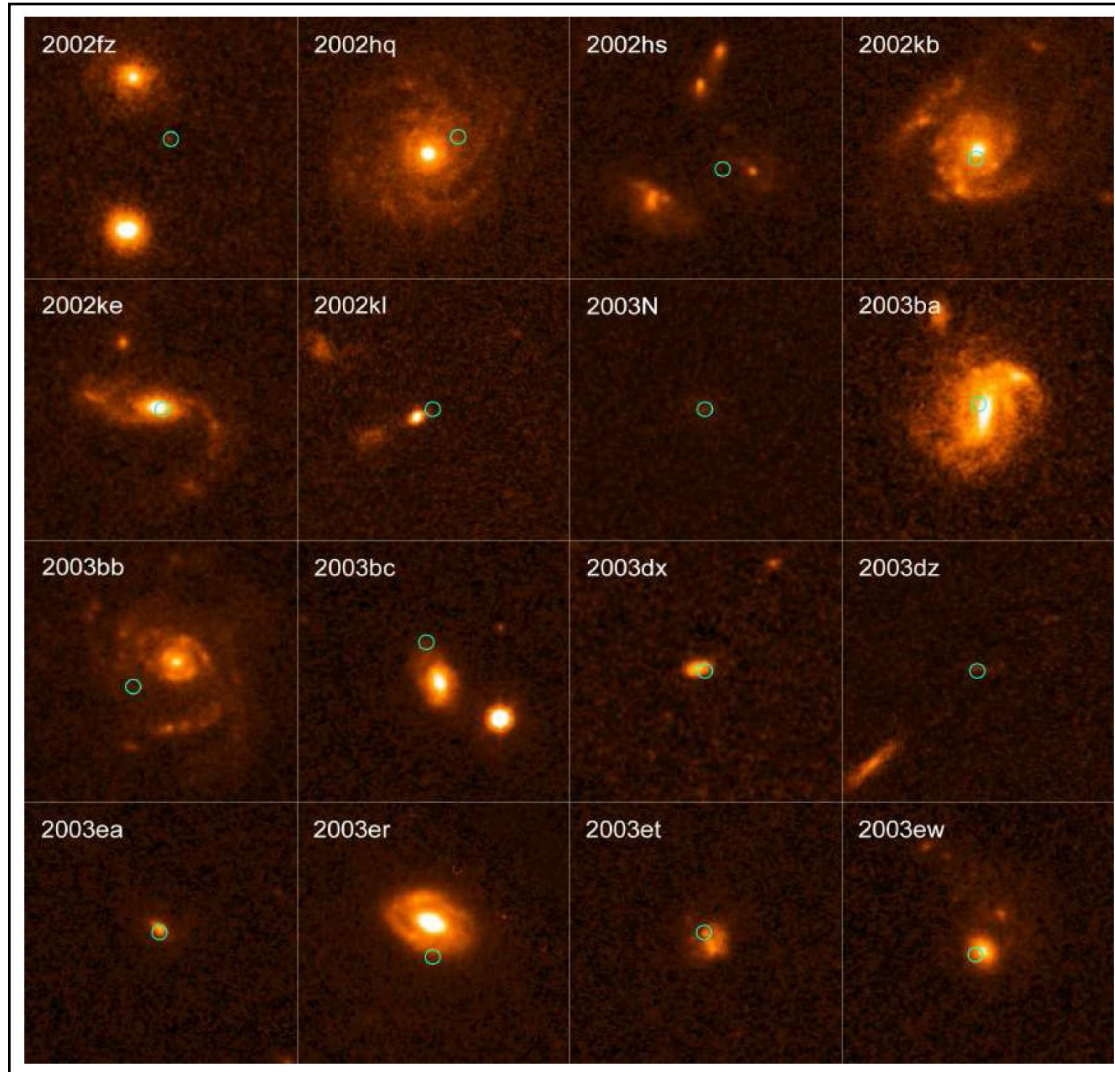




- Small, irregular, faint galaxies
- Possibly less chemically evolved, lower metallicity environment
- statistics will be sufficient

Fruchter et al. (2006)

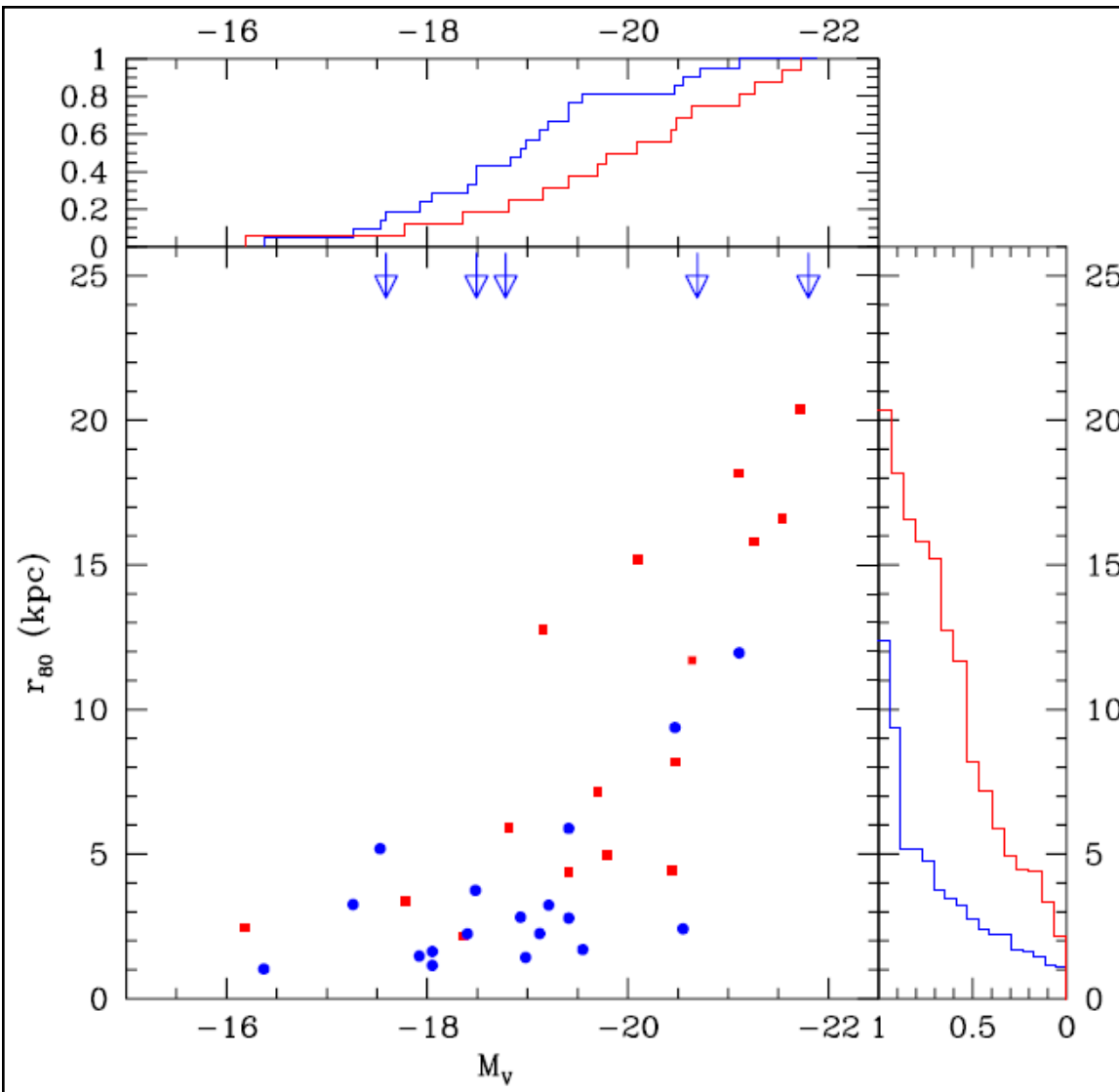
SN hosts



- Brighter, usually spiral galaxies
- Suggests more chemically evolved environment

Fruchter et al. (2006)

GRB/SN and location in hosts

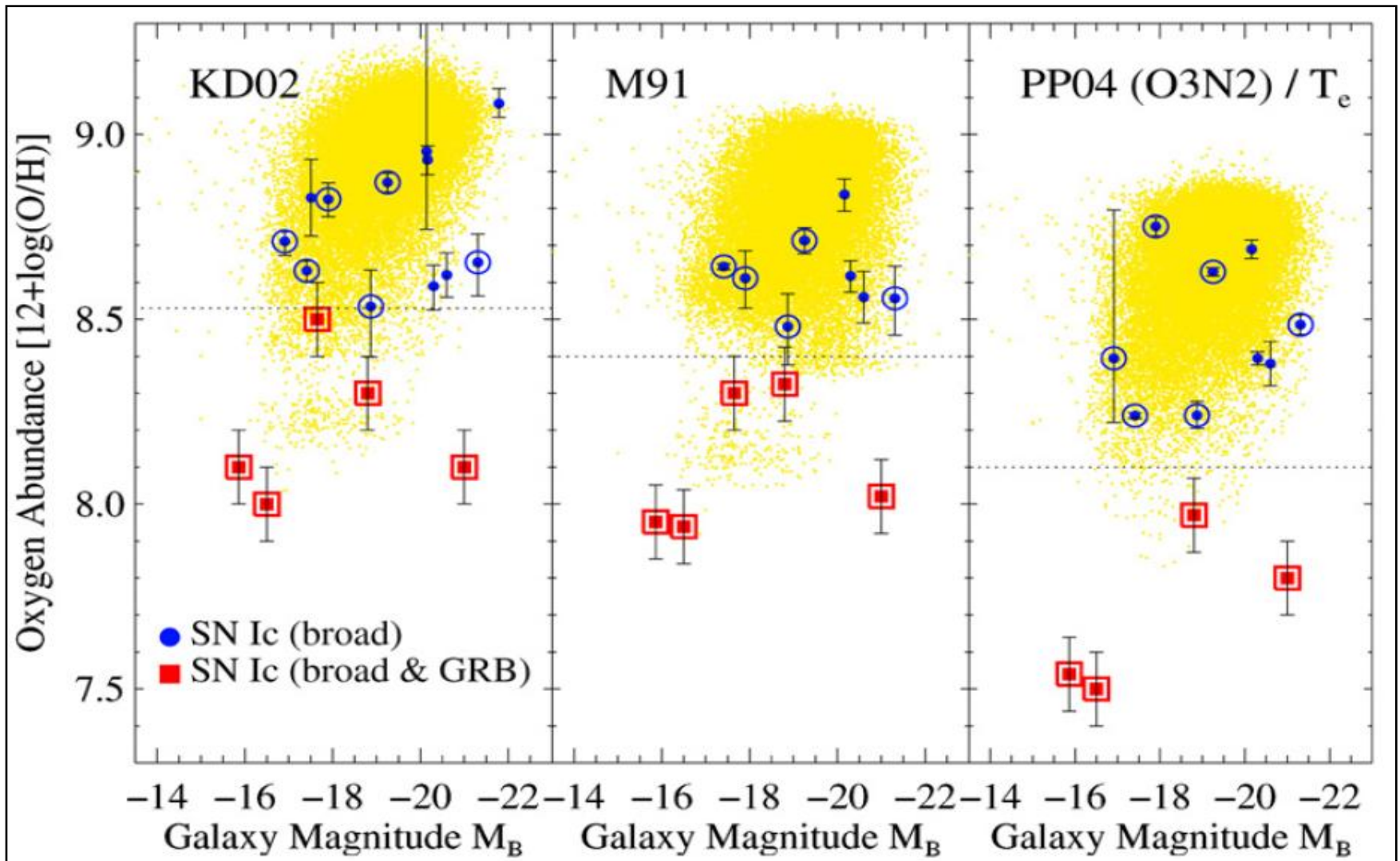


- GRBs locate more bright, central regions
- Suggests more massive progenitor origin of GRBs

Fruchter et al. (2006)

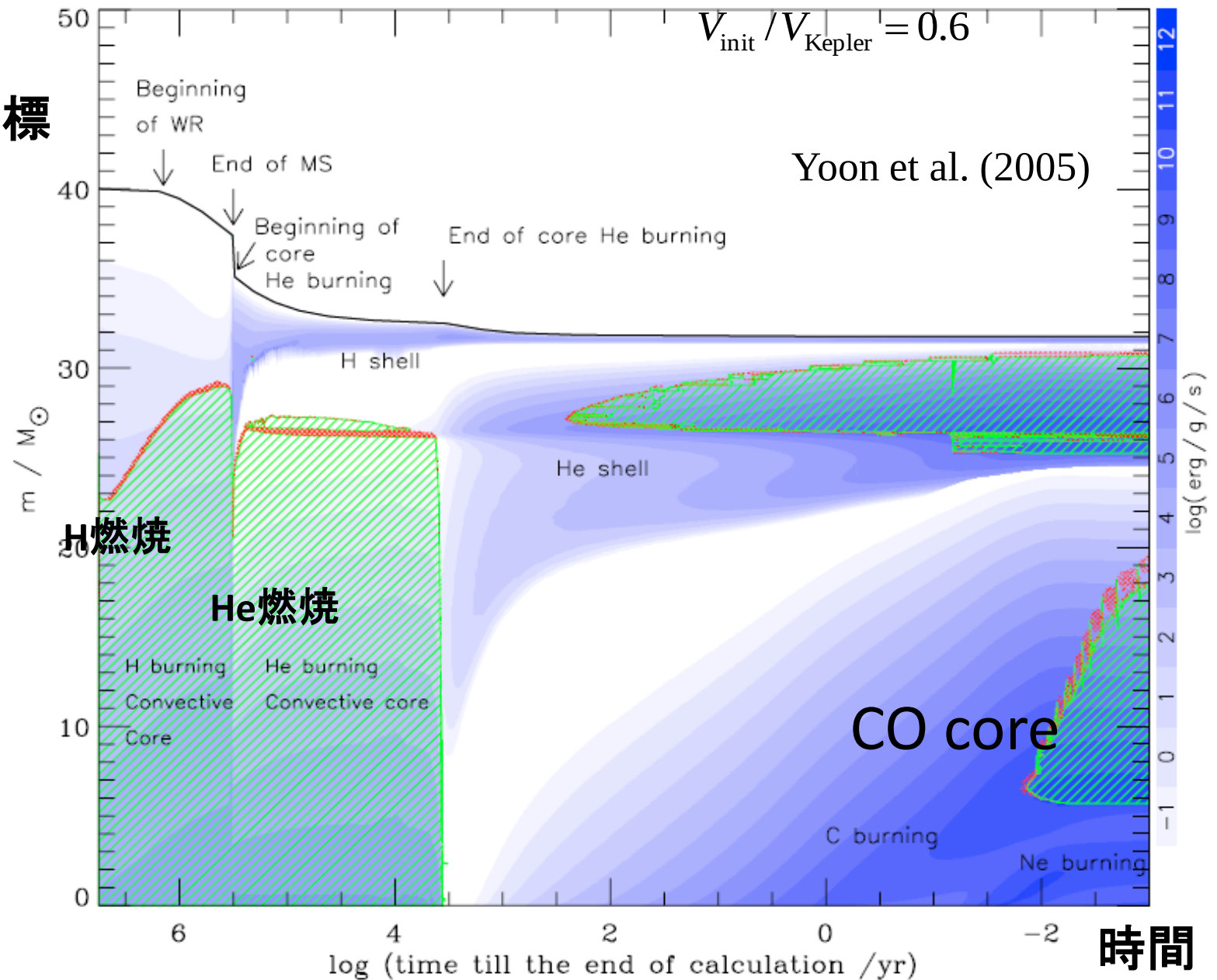
GRB/SN and Metallicity

Modjaz et al. (2008)

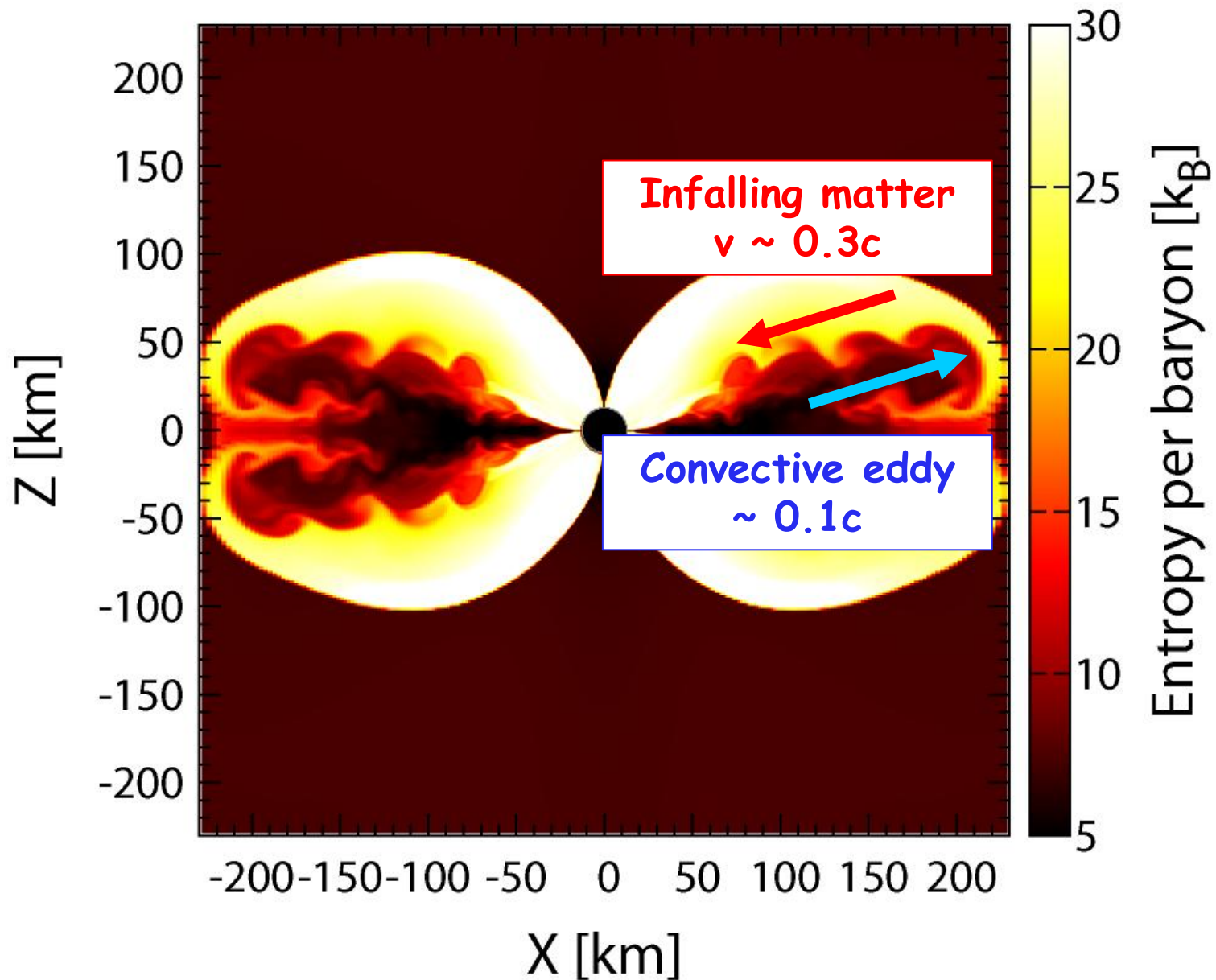


Chemically homogeneous evolution

質量座標



KH instability



Code Validity (球対称崩壊)

