

# 大質量星重力崩壊に付随する Black Hole形成とGRB

長倉 洋樹 (早稲田)

2010年3月1-3日「ブラックホール磁気圏研究会」@大阪市大

# アウトライン

1. イントロダクション
2. Long GRB の理論的研究の現状、問題点

I 星の進化計算

II セントラルエンジン

III 相対論的ジェット of 伝搬

IV Prompt emission for Long GRB

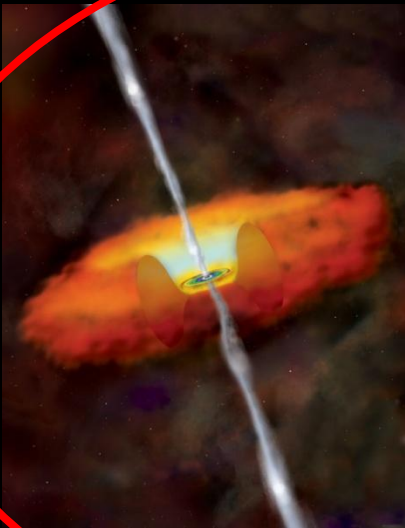
3. まとめ

# 1. イントロダクション

## 一般相対論の検証 (Will 1993を参照)

弱重力場の下での  
強重力場の下での

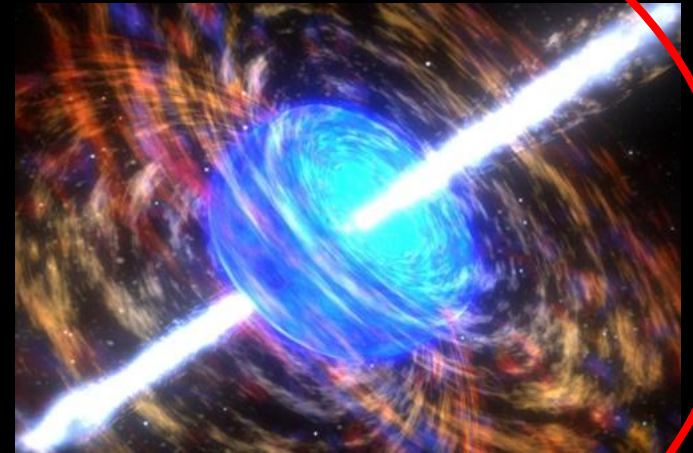
ブラックホールが作られる“動的”な現象  
強重力場の激しい時間変動を引き起こす  
⇒ 大量の重力波を出す候補天体



AGN



Stellar Mass BH candidate

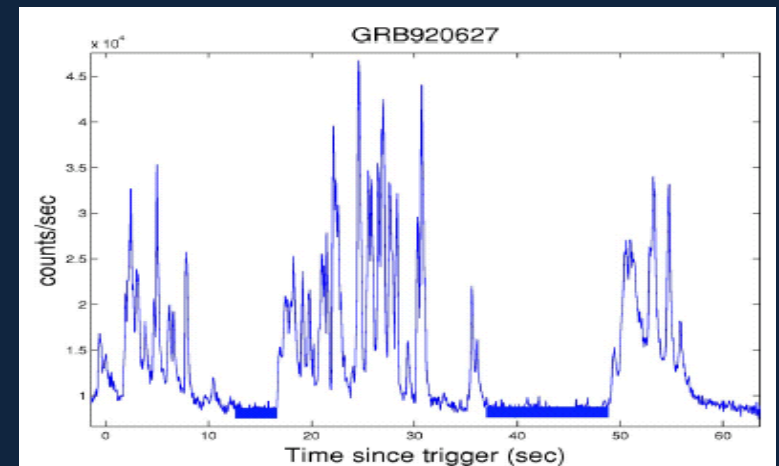
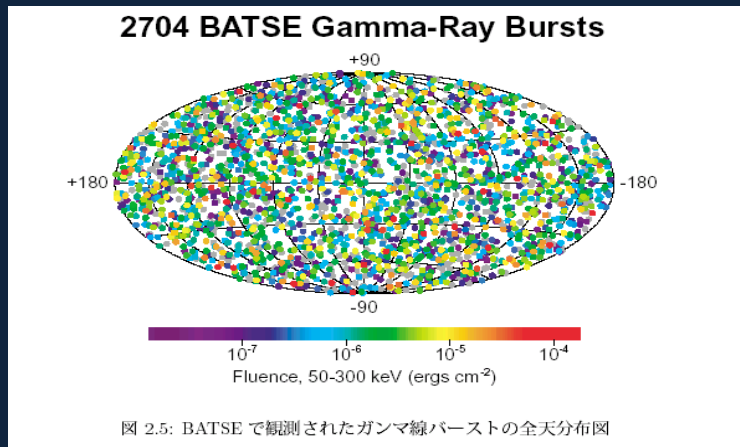


GRB

# ガンマー線バースト(GRB)

天空の一点から、非常に強烈な $\gamma$ 線が降り注いで来る  
宇宙最大の爆発現象

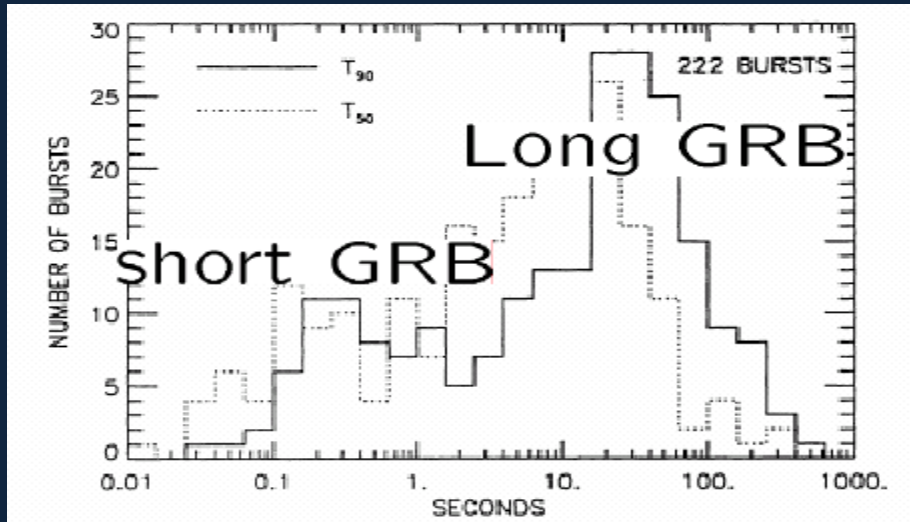
- ✓ エネルギー:  $E \approx 10^{52\sim 54} \text{ erg}$
- ✓ 観測頻度: 約1回/day
- ✓ 宇宙論的距離で起こっている
- ✓ 初期に激しい時間変動



BATSE で観測されたGRBの全天空分布

典型的な光度曲線

# 2種類のGRB



$t > 2s$   
Long GRB

$t < 2s$   
Short GRB

起源が違う??

非常に高密度な星 ( $\rho > 10^{14} \text{g/cm}^3$ )



Short GRB: コンパクト星(中性子星)同士の衝突?

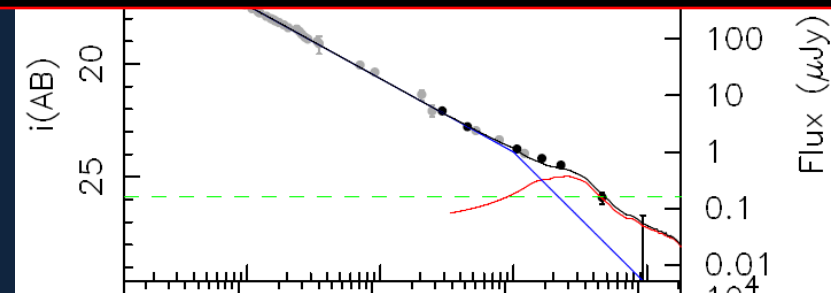
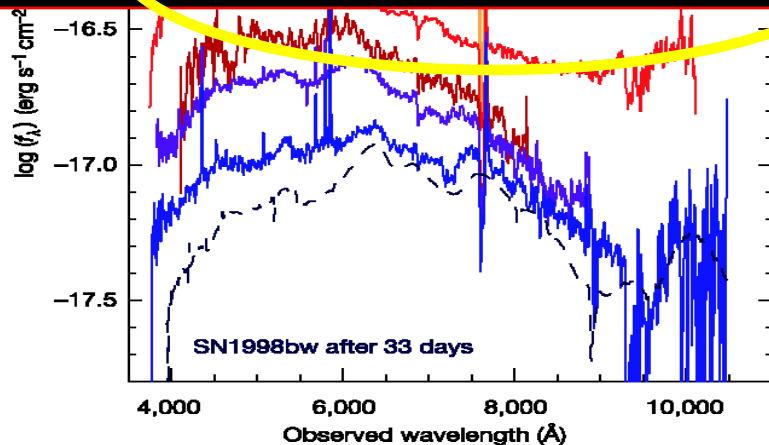
Long GRB: 大質量星の爆発(超新星爆発)と関連?

GRB	SN	$M_{CO}/M_{\odot}$	$M_{ms}/M_{\odot}$	$E/10^{51}\text{erg}$	$M(^{56}\text{Ni})/M_{\odot}$
980425	1998bw	14	40	30	0.4
030329	2003dh	11	35	40	0.35
031203	2003lw	16	45	60	0.55

少なくとも一部のGRBは超新星爆発と関連



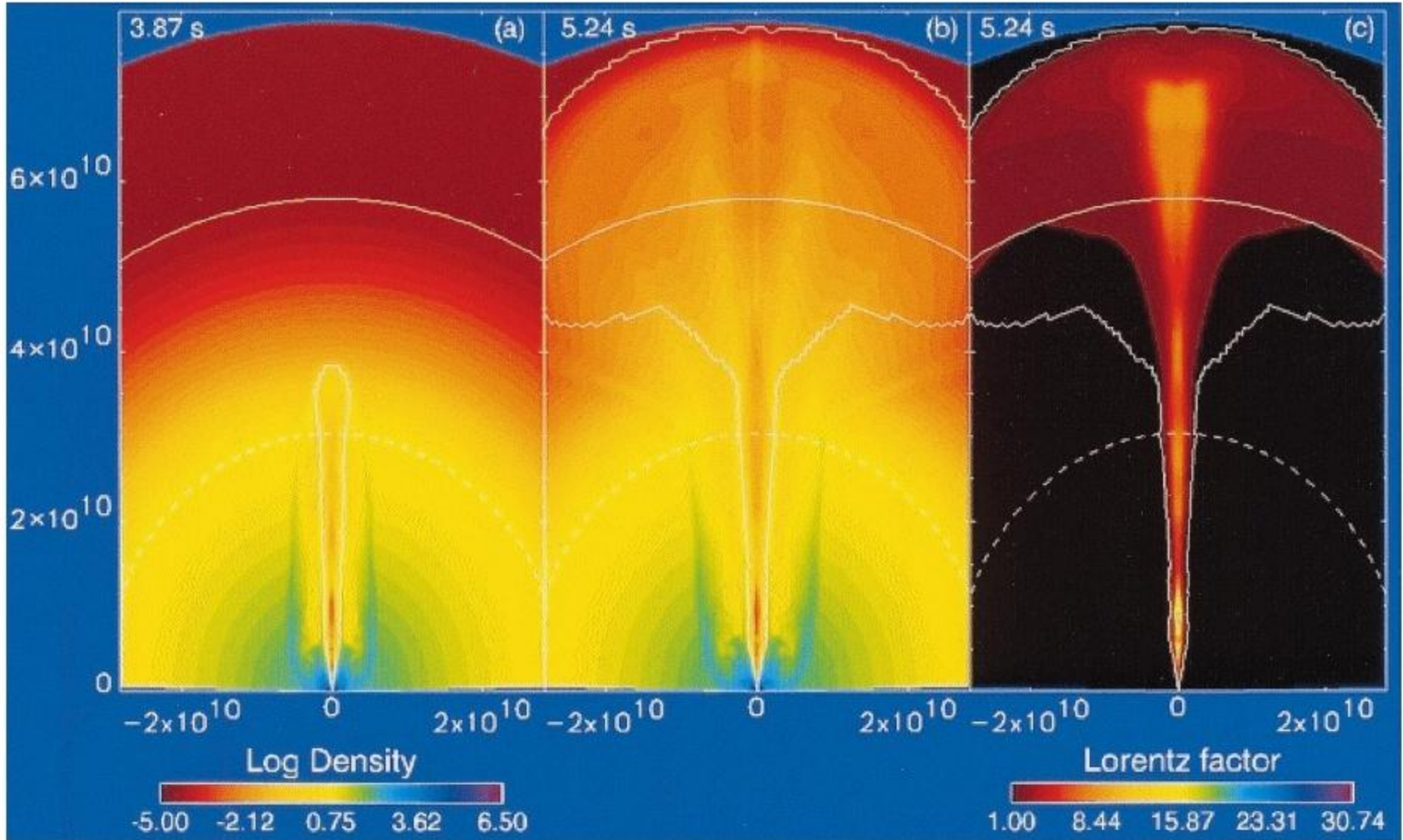
Core collapse Supernova と関連したモデル  
**Collapsar Model, Magnetar Model**



Tanvir et al. 2008

高速回転する

# Collapsar Model



ブラックホール

MacFadyen & Woosley (1999)

Aloy et al (2000)

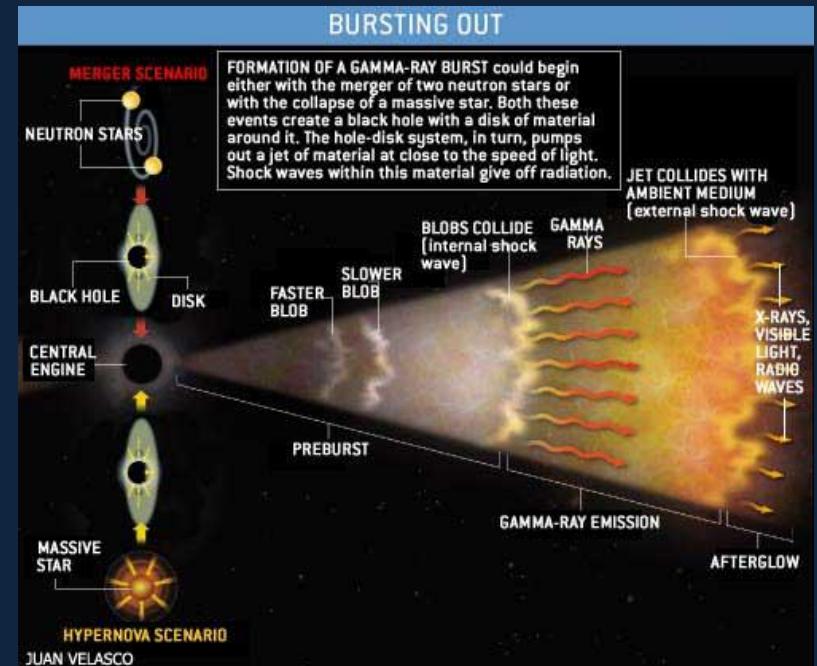
# Long GRB の理論メカニズム解明に向けて

1. 星の進化計算
2. セントラルエンジン
3. 星内部のジェット of の伝搬
4. 星外部でのGRB発生機構



各phaseを総括して理解  
しなければならない

Horizon	: $10^6$ cm
Stellar Radius	: $10^{11}$ cm
Internal Shock	: $10^{14}$ cm
After glow	: $10^{16}$ cm





# アウトライン

## 1. イントロダクション

## 2. Long GRB の理論的研究の現状、問題点

I 星の進化計算

II セントラルエンジン

III 相対論的ジェット of 伝搬

IV Prompt emission for Long GRB

## 3. まとめ

# I 星の進化計算

Collapsar Model



星は崩壊直前に高速回転している必要がある

- Mass loss と共に角運動量が逃げていく  
赤色巨星、Wolf-Rayet phaseでmass loss

**越えなきゃ  
いけない壁**

- 磁場込みの進化計算：回転を遅くするセンス  
(Heger et al 2005, Petrovic et al 2005)

Magnetic torqueでcoreの回転をブレーキ(数十倍遅くなる)



上記の2つの問題をパスするモデル

- Chemical Homogeneous Evolution
- Low metallicity Yoon (2006), Woosley & Heger (2006)

# Chemical Homogeneous Evolution

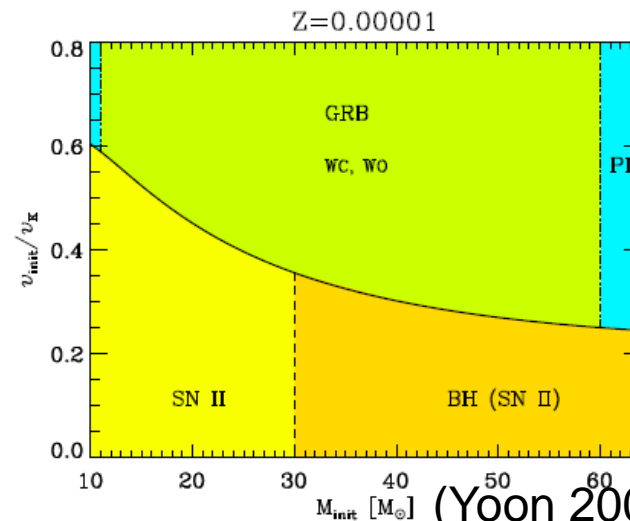
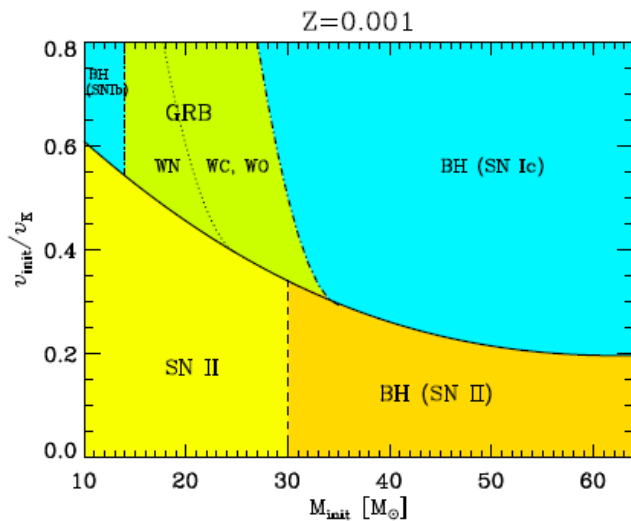
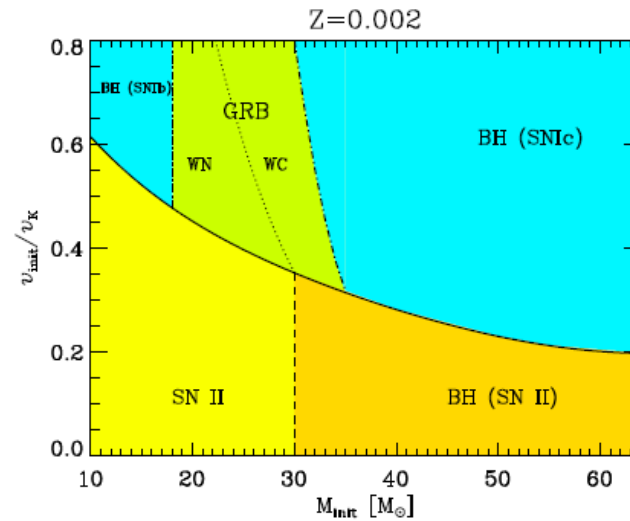
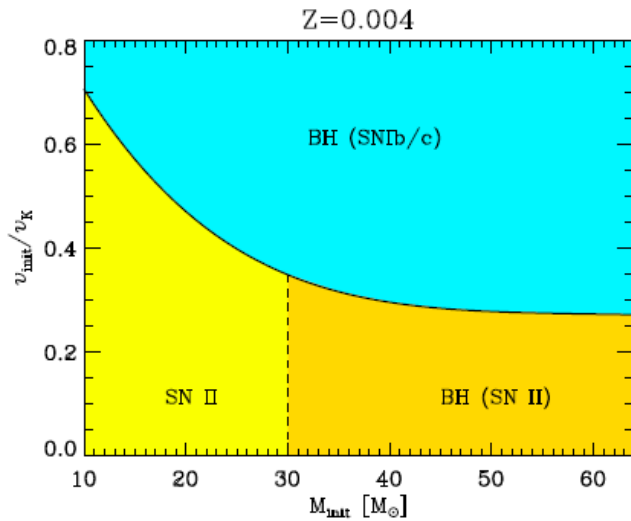
Ma

M

Rotatio

水

赤色



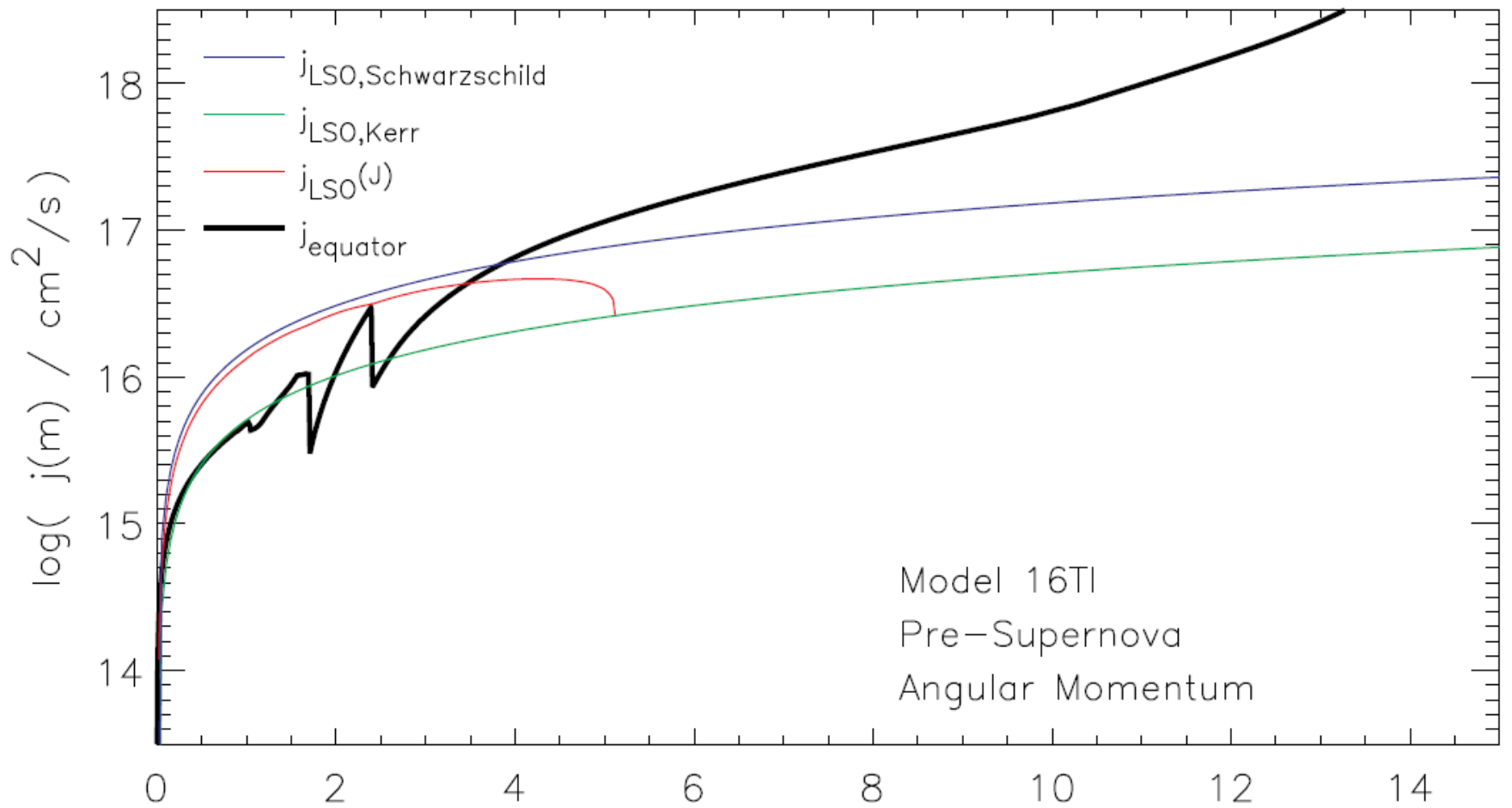
度)

2000)

(Yoon 2006)

Low metallicity はここに必要

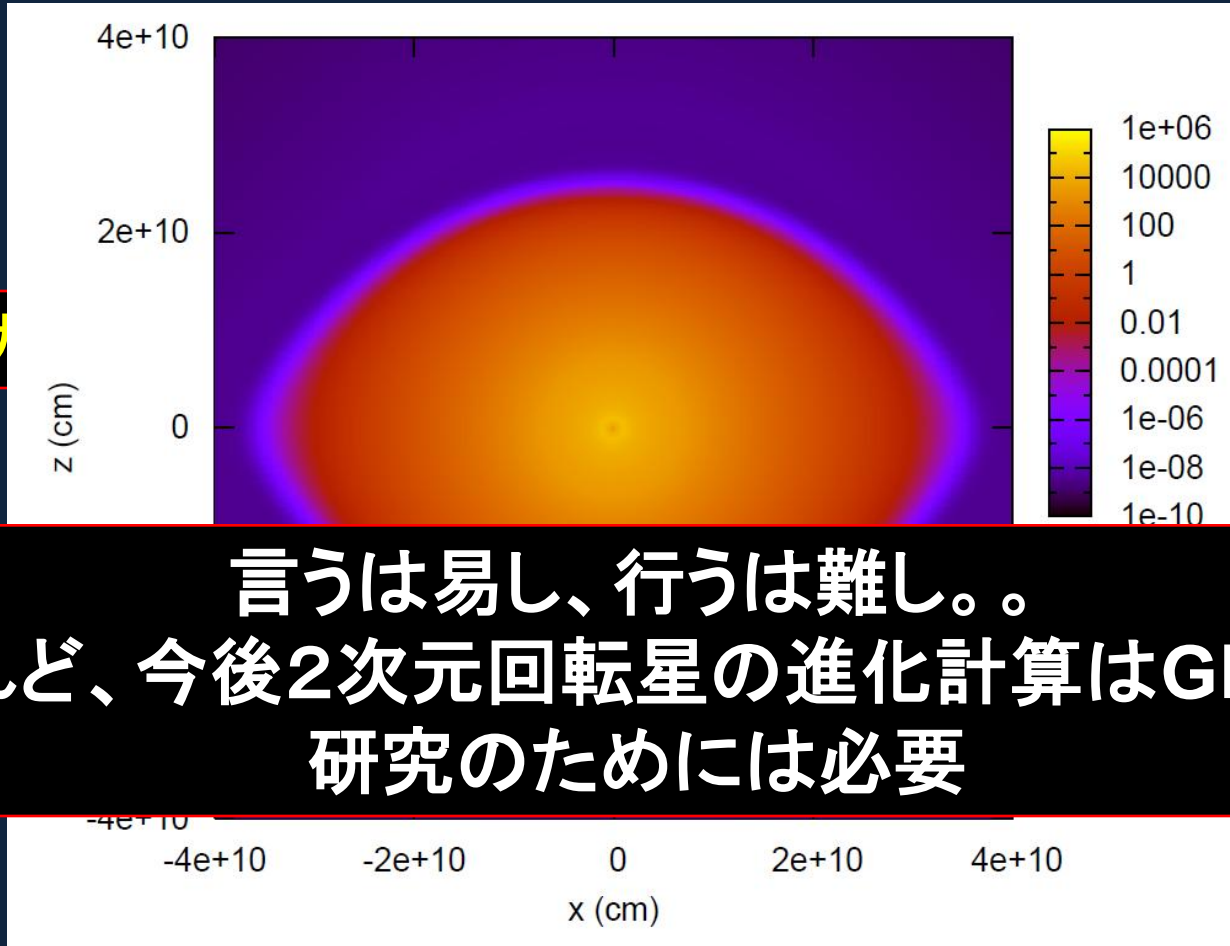




16TH	3.3	390	WR	1.0	yes	11.45	1.81	64.1	1.7	0.24
16TI	3.3	390	WR	0.3	yes	13.95	1.60	86.7	0.90	0.44
16TJ	3.3	390	WR	0.1	yes	15.21	1.88	178	0.67	0.61

# 高速回転している星の進化計算

現状



言うは易し、行うは難し。。  
けれど、今後2次元回転星の進化計算はGRBの  
研究のためには必要

(Kiuchi et al. 2010 in prep, Nagakura et al. 2010 in prep )

# Toward 2D Evolution for Rotating Stars

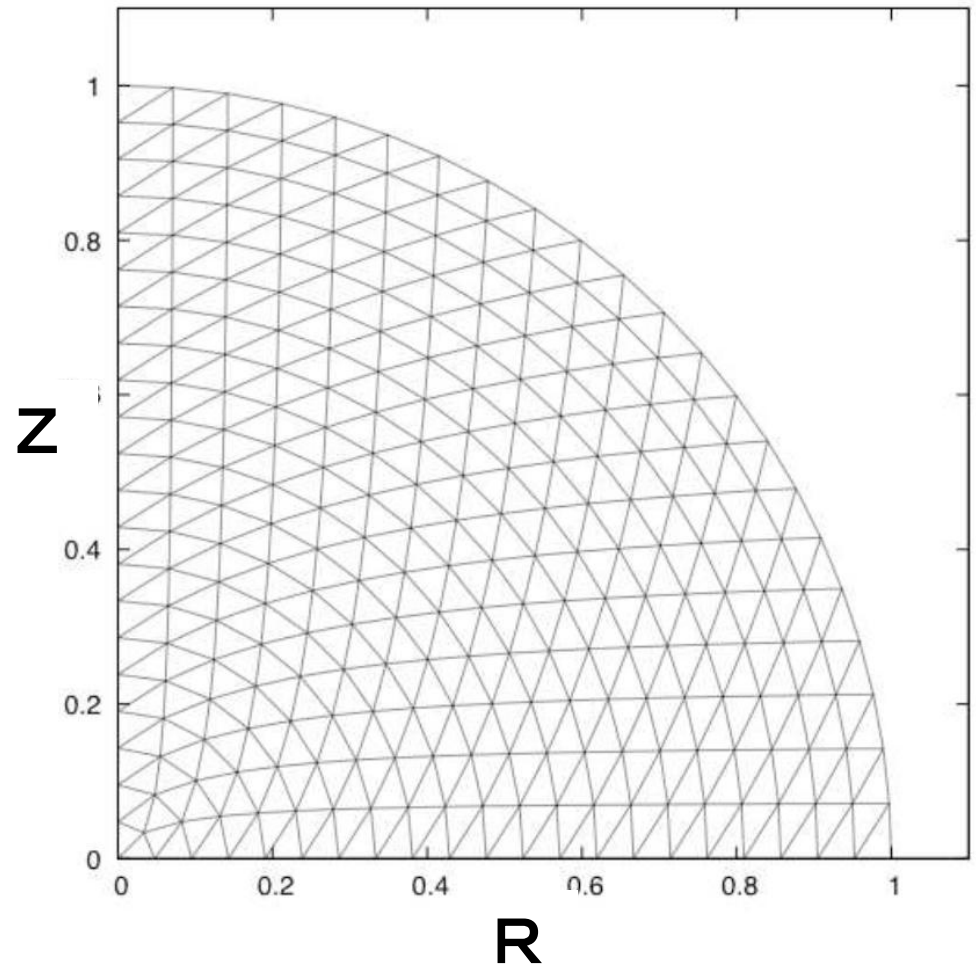
Yamasaki & Yamada  
(Preliminary)

2D Lagrange Code

Ardelian ('87, '96) の  
Hydrodynamicsのコードがもと

現状

現在はポリトロープ球の回  
転星が作れるかチェック



# アウトライン

## 1. イントロダクション

## 2. Long GRB の理論的研究の現状、問題点

I 星の進化計算

II セントラルエンジン

III 相対論的ジェット of 伝搬

IV Prompt emission for Long GRB

## 3. まとめ

# セントラルエンジンの解明に向けて

- ・ 星の崩壊（鉄コアの崩壊）  
↓
- ・ 原始中性子星の形成（もしくはマグネターの形成）  
↓
- ・ ブラックホールの形成



非線形現象 + 強重力場 + Microphysics

**数値相対論の進展が必要不可欠**



今後のAccretion Diskの解析のための、  
現実的な初期条件のサーチ  
(カーパラメータ、磁場の構造、降着円盤の状態)

- ✓ 上記の研究を下に、定常時空上でジェットの形成メカニズムを探る
- ✓ 超新星爆発との関連はどうか？



# アウトライン

## 1. イントロダクション

## 2. Long GRB の理論的研究の現状、問題点

I 星の進化計算

II セントラルエンジン

III 相対論的ジェット of 伝搬

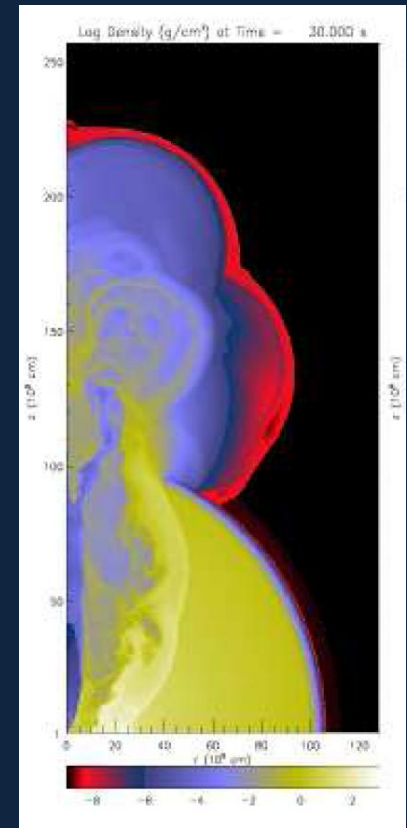
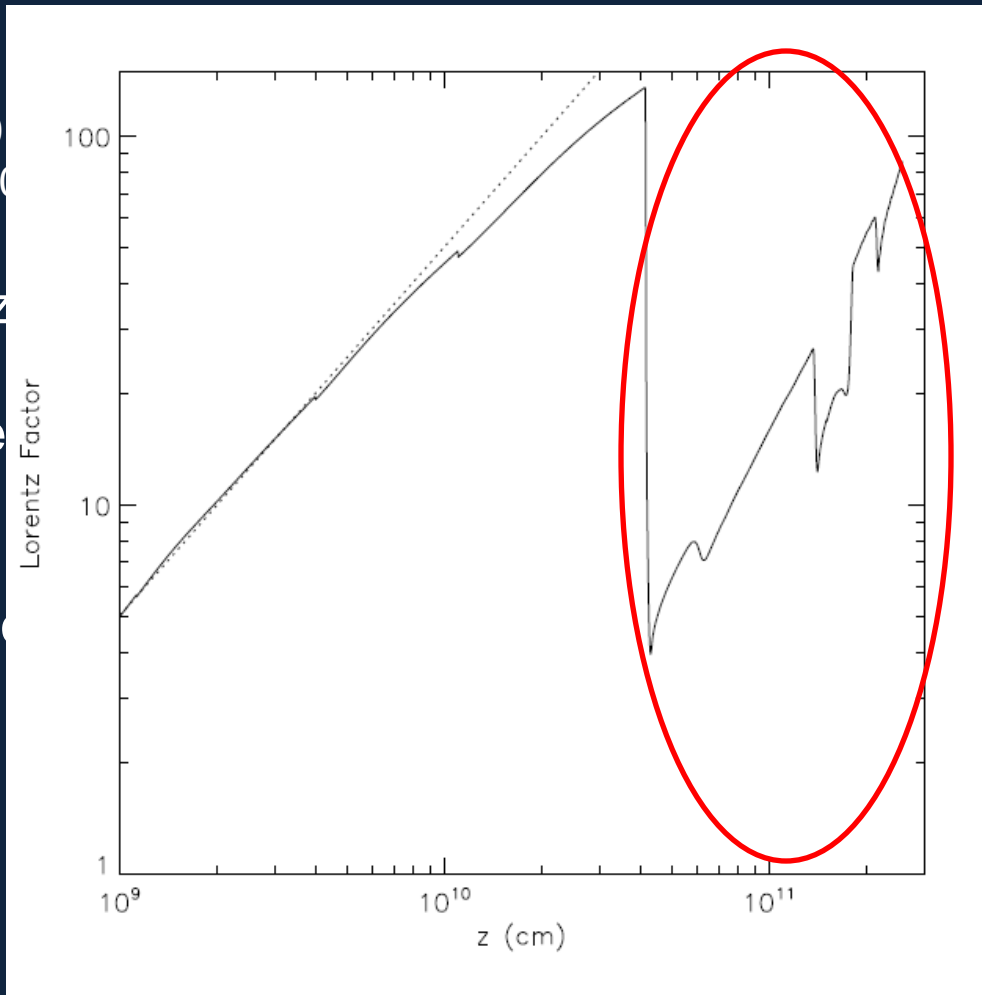
IV Prompt emission for Long GRB

## 3. まとめ

# 特殊相対論コードを用いたジェットの伝搬 及びbreak outの計算

(Aloy et al. 2000  
Morsony et al. 2007)

- ✓ High Lorentz factor
- ✓ Adaptive Mesh Refinement  
(例: FLASH, GRMHD)
- ✓ Jet の injection



(Morsony et al 2007)

# 今後の研究の流れ

- ✓ セントラルエンジンとリンクした計算

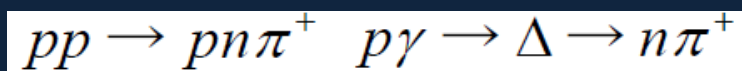


Nagkura et al 2010 in prep

- ✓ ジェット伝搬phaseをどの観測量で検証するか？

Photomeson interaction からの high energy neutrino

(Meszaros and Waxman 2001)



- ✓ GRB 本体までの計算 (星の十分遠方まで  $\sim 10^{13}$  cm)

# アウトライン

## 1. イントロダクション

## 2. Long GRB の理論的研究の現状、問題点

I 星の進化計算

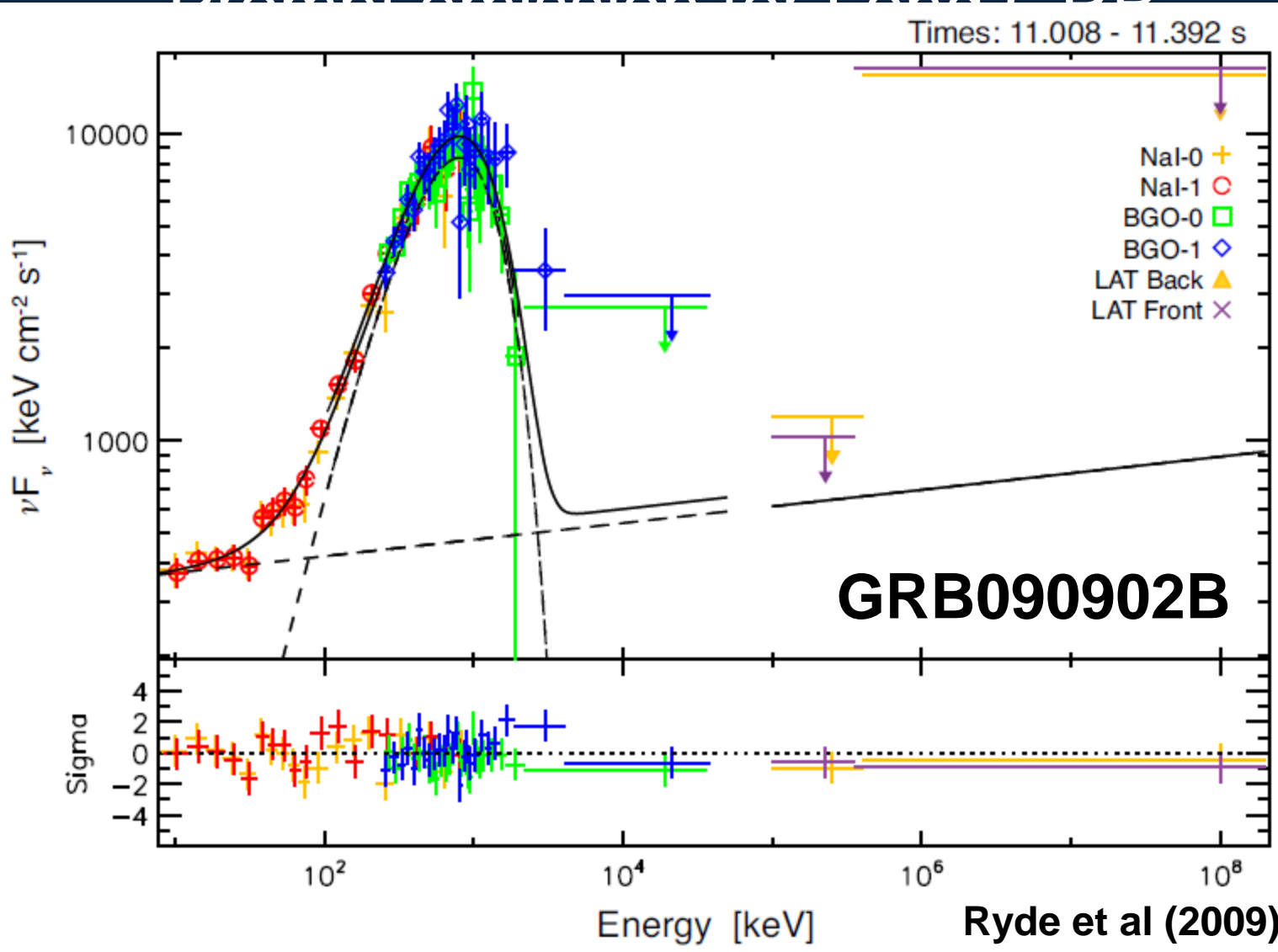
II セントラルエンジン

III 相対論的ジェット of 伝搬

IV Prompt emission for Long GRB

## 3. まとめ

# Drompt emission for Long GRB

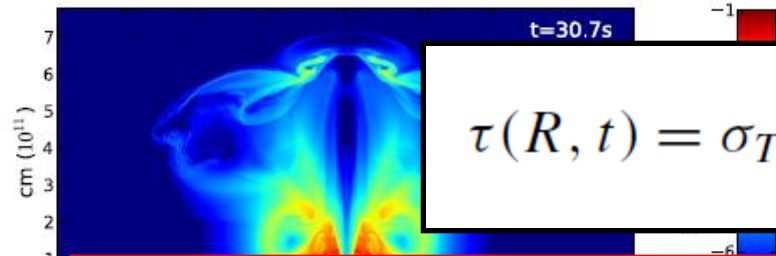
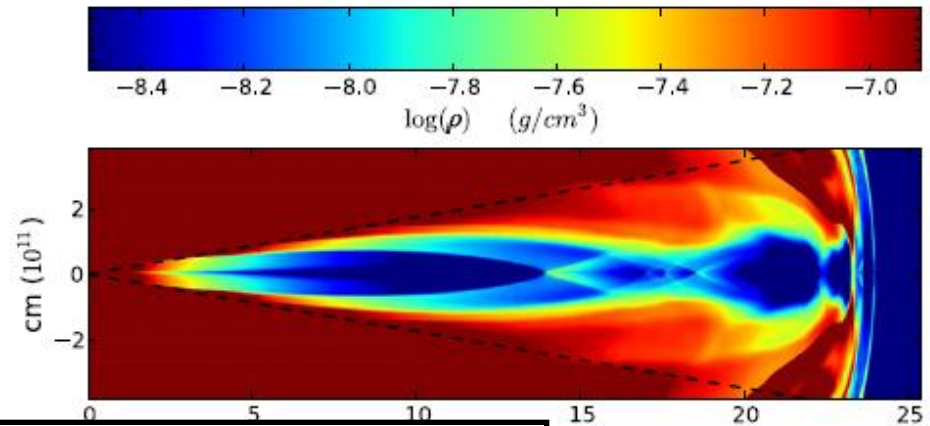
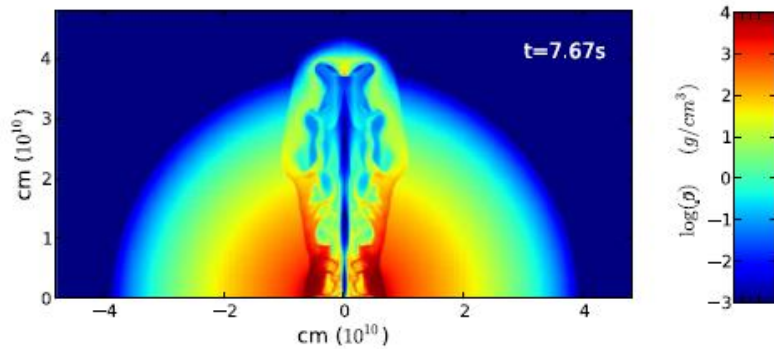


thick)

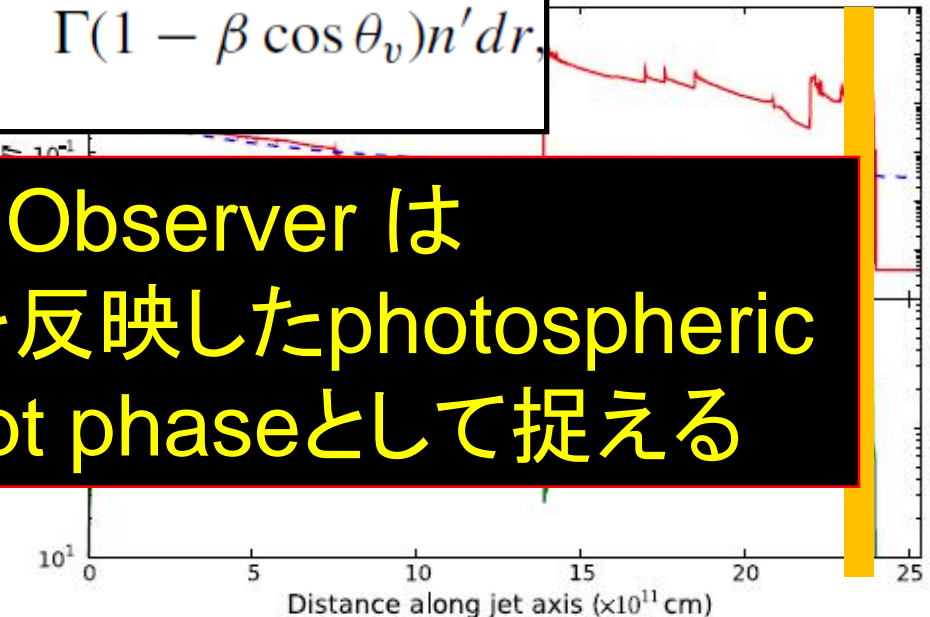
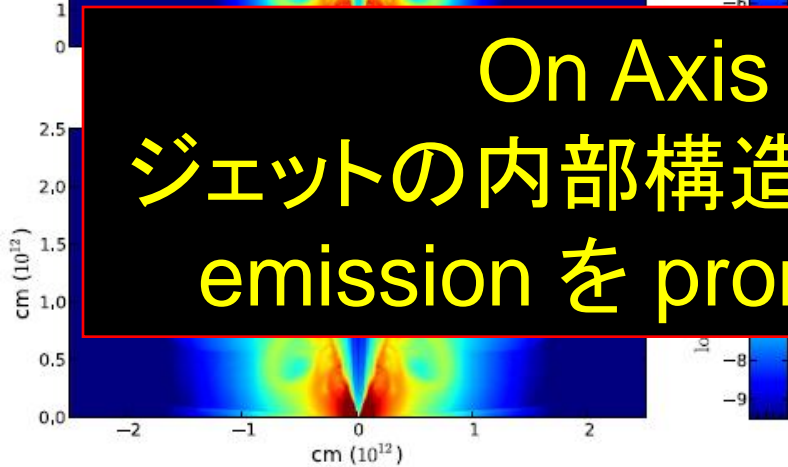
ず。

(Pe'er et al.2005; Beloborodov 2009)

# ジェット伝搬と Photospheric Emission



$$\tau(R, t) = \sigma_T \int_R^\infty \Gamma(1 - \beta \cos \theta_v) n' dr$$



On Axis の Observer は  
ジェットの内部構造を反映した photospheric  
emission を prompt phase として捉える

# 今後の進展

- ✓ 星中のジェット伝搬からGRB のemission phase にかけてのLong Term数値実験
- ✓ セントラルエンジンとリンクした計算
- ✓ 多次元の輻射流体コードの構築
- ✓ 数値実験結果に基づいた解析計算

# アウトライン

## 1. イントロダクション

## 2. Long GRB の理論的研究の現状、問題点

I 星の進化計算

II セントラルエンジン

III 相対論的ジェット of 伝搬

IV Prompt emission for Long GRB

## 3. まとめ



まとめの図

Long GRB

新たな起源

大質量星の崩壊

回転星の進化

セントラルエンジン

ジェット伝搬

(星の外側) GRB  
Prompt emission

✓ Chemical Homogeneous evolution と Low Metallicity



Fast rotating  
presupernova star

✓ 2次元回転星の進化 計算

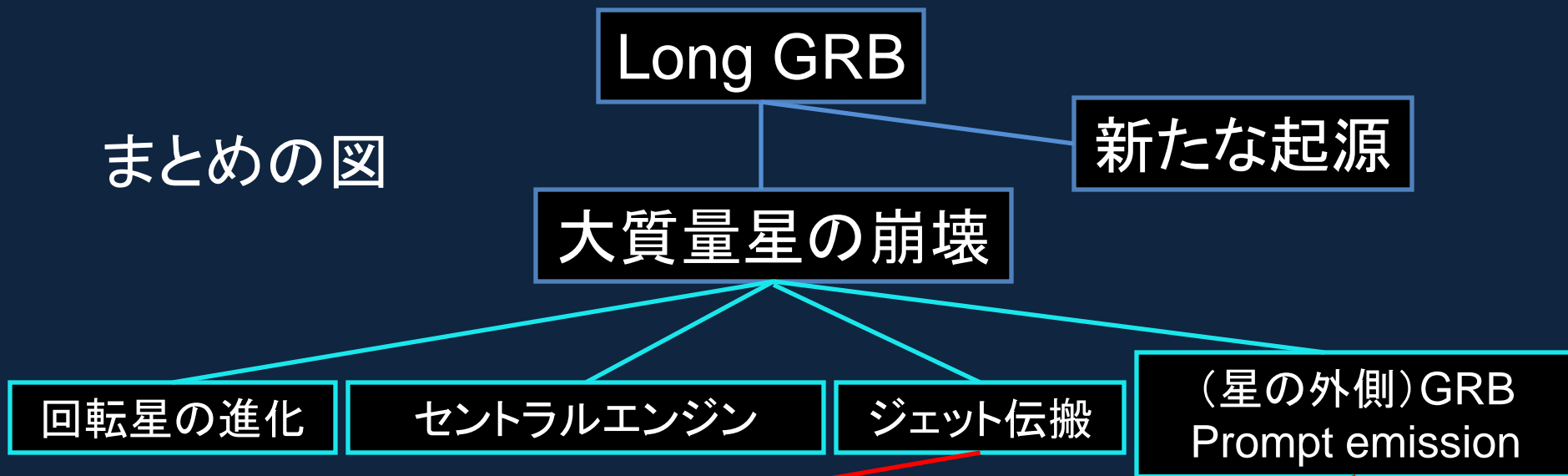
✓ 数値相対論の進展

定常時空となった後のphaseの  
研究の初期条件のサーチ

✓ セントラルエンジンの  
開始、継続、終了の時間

✓ 超新星爆発との関連

## まとめの図

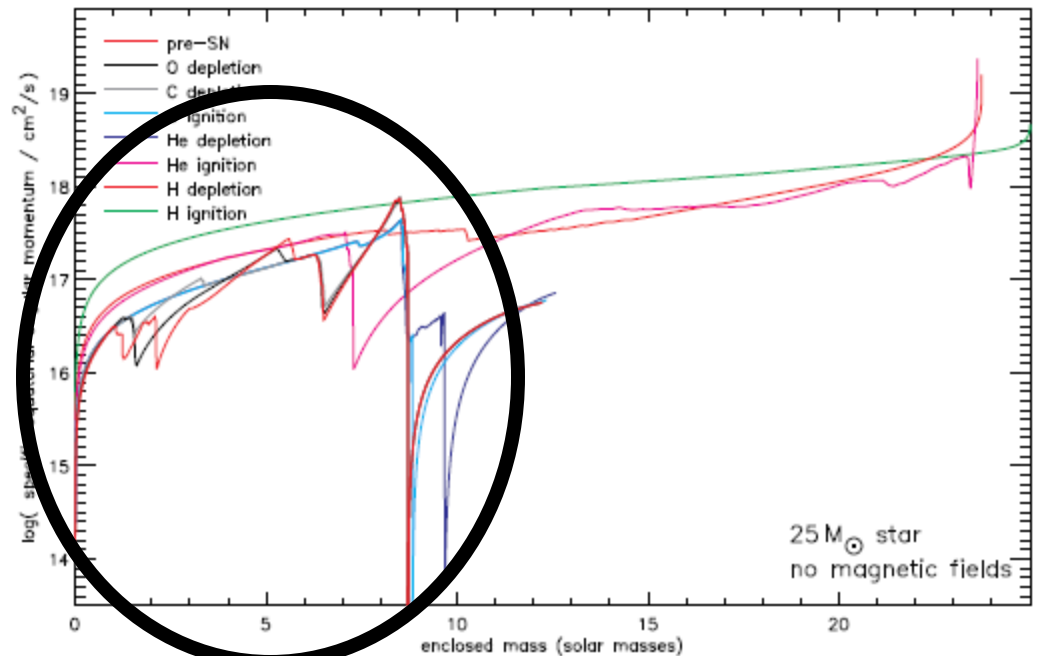


- ✓ コード開発の進歩
- ✓ ジェットと星の外層との interaction の理解
- ✓ セントラルエンジンとリンクした計算が必要

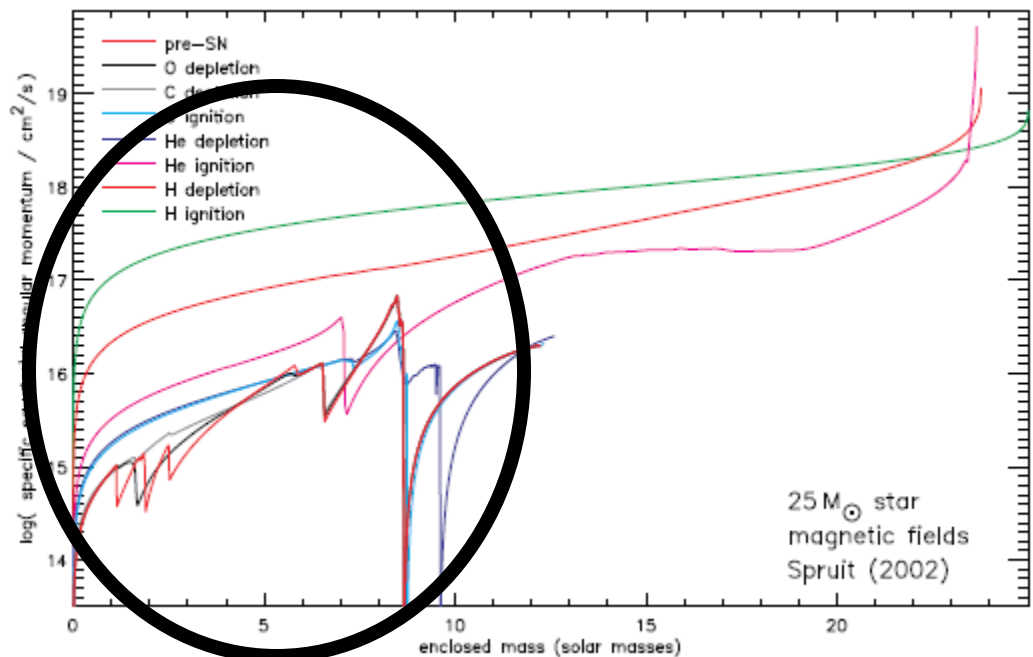
- ✓ Internal Shock と Photospheric emission
- ✓ Long Term Simulation が徐々にできつつある
- ✓ 数値実験を下にした解析計算

以下 補足

# 磁場なし

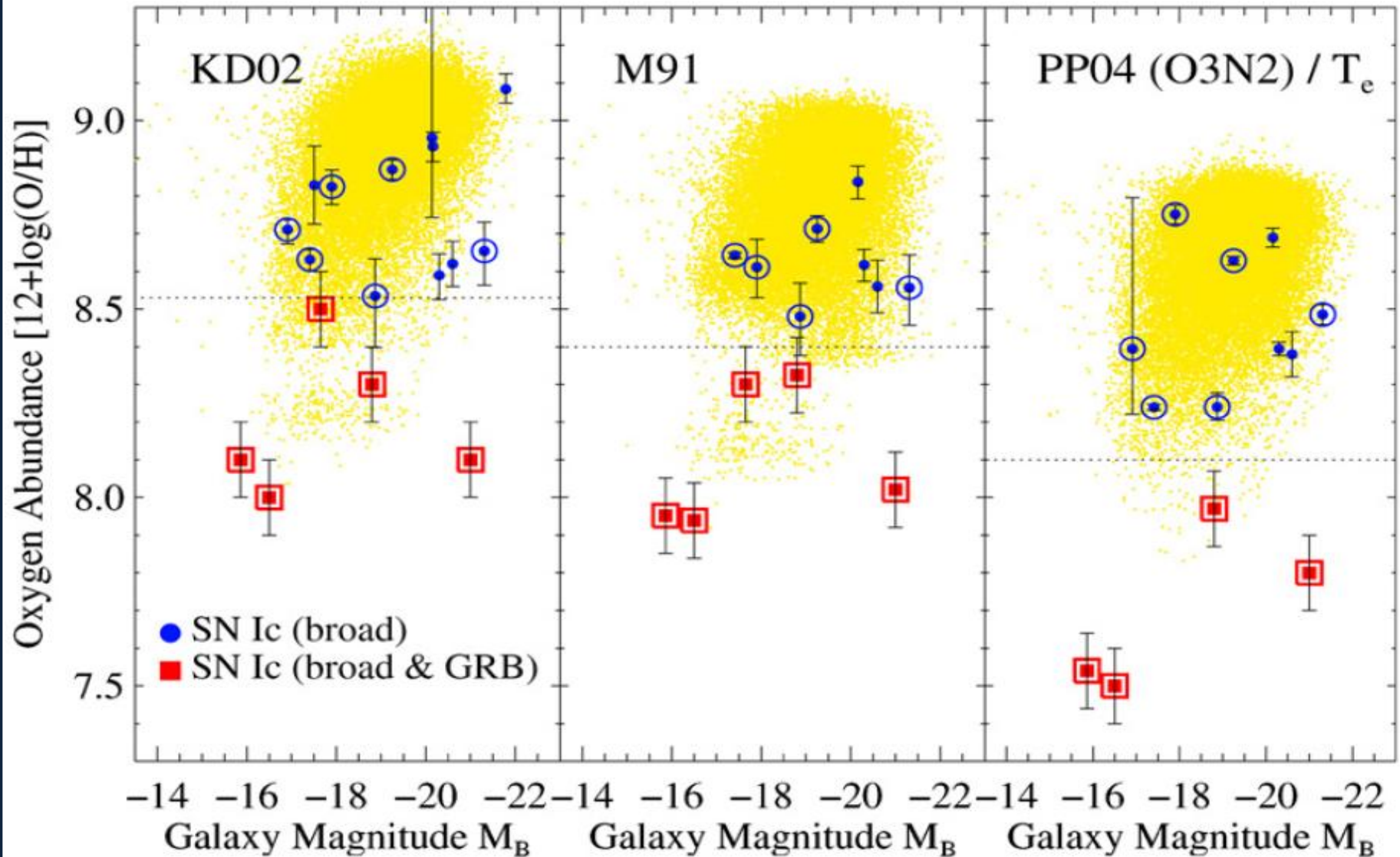


# 磁場込み



# GRB/SN Metallicity Relations

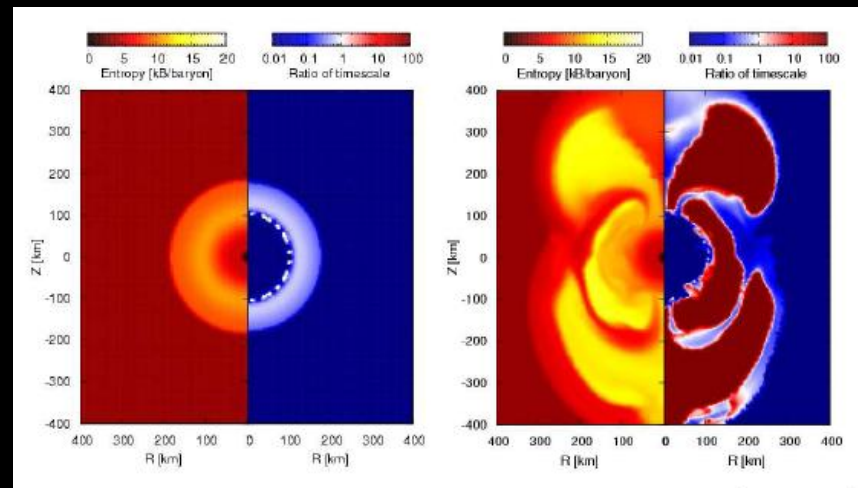
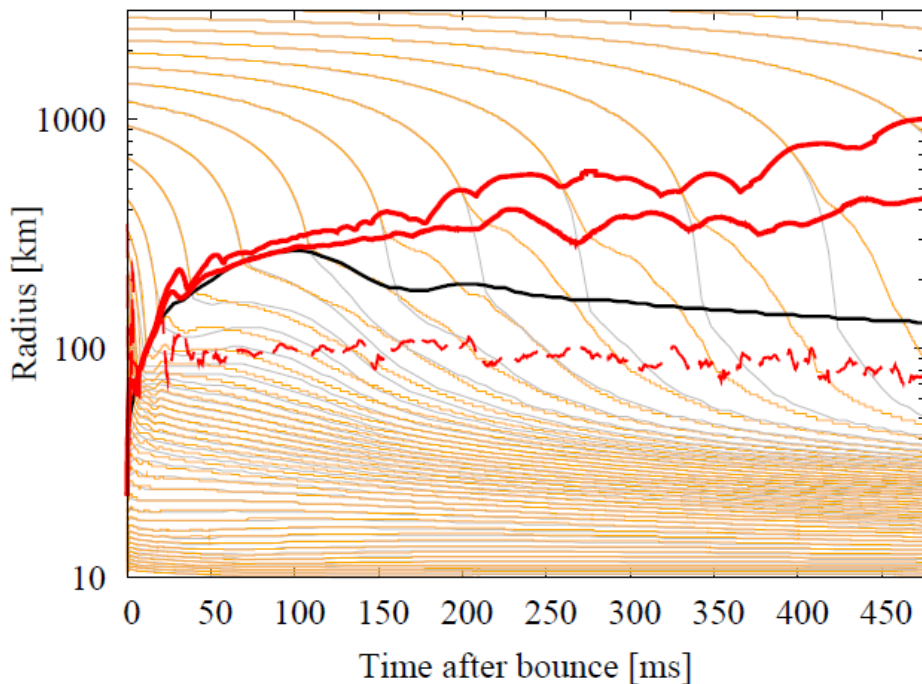
Modjaz et al. (2008)



# Standard Scenario For Supernova Explosions

## 13M<sub>sun</sub> の星の爆発成功モデル (SASI aided neutrino heating)

Suwa et al 2009



(d) Core Bounce

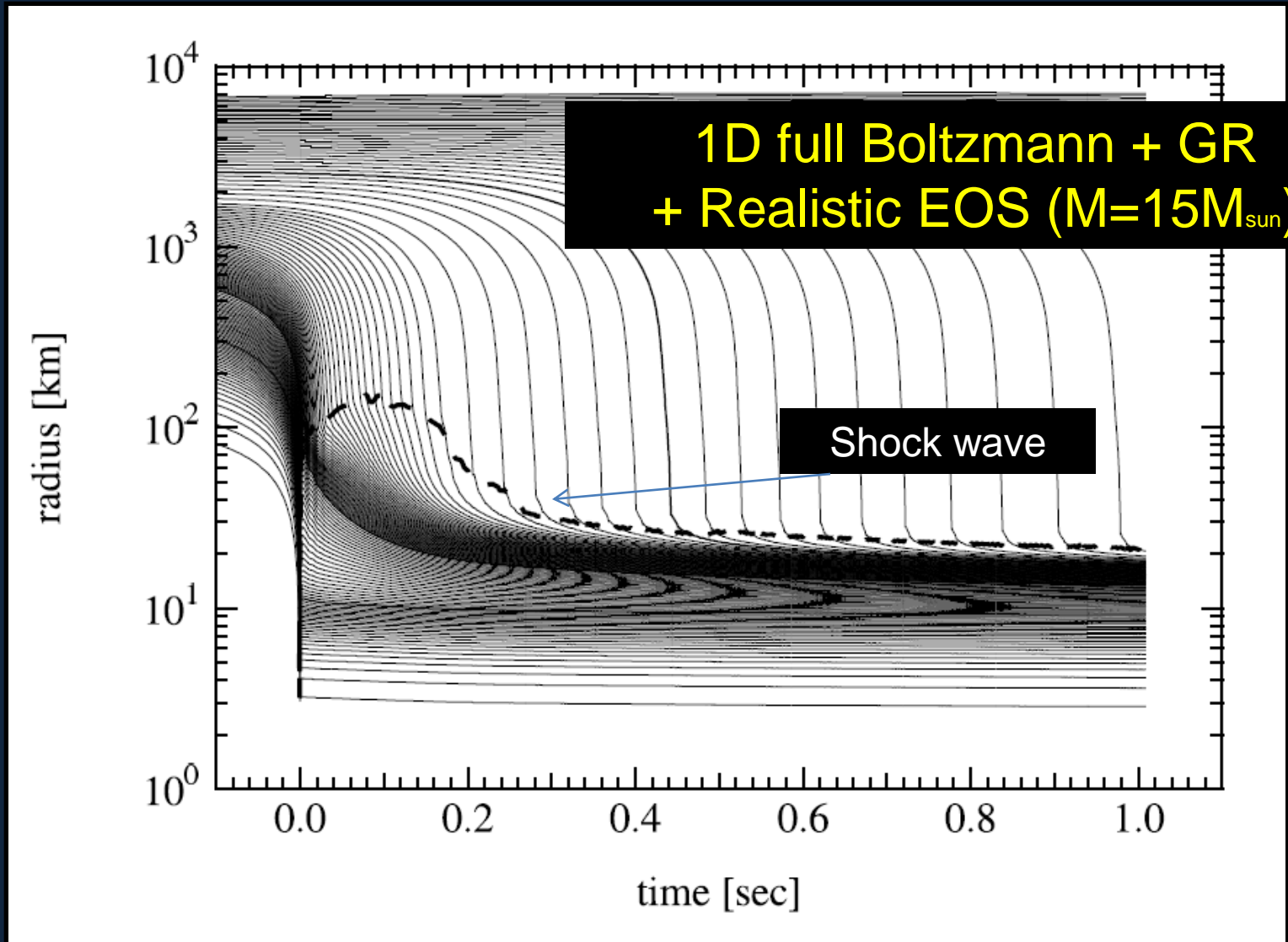
$\nu$

(e) Neutrino Burst

(a) Shock Stall

(b) Shock Revival

# 大質量星であればあるほど爆発しづらい



# Black Hole形成を伴う現象の多次元的数値実験

## 数値相対論

$${}^{(4)}R_{ab} = 8\pi(T_{ab} - \frac{1}{2}g_{ab}T) \quad : \quad \text{アインシュタイン方程式}$$



$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -\alpha^2 + \beta^k\beta_k & \beta_i \\ \beta_j & \gamma_{ij} \end{bmatrix}$$

$$K_{ab} \equiv -\frac{1}{2}\mathcal{L}_n\gamma_{ab}$$

### 3 + 1 Decomposition (ADM)

$${}^{(3)}R + K^2 - K_{ij}K^{ij} = 16\pi\rho_h$$

$$D_j(K^{ij} - \gamma^{ij}K) = 8\pi j^i$$

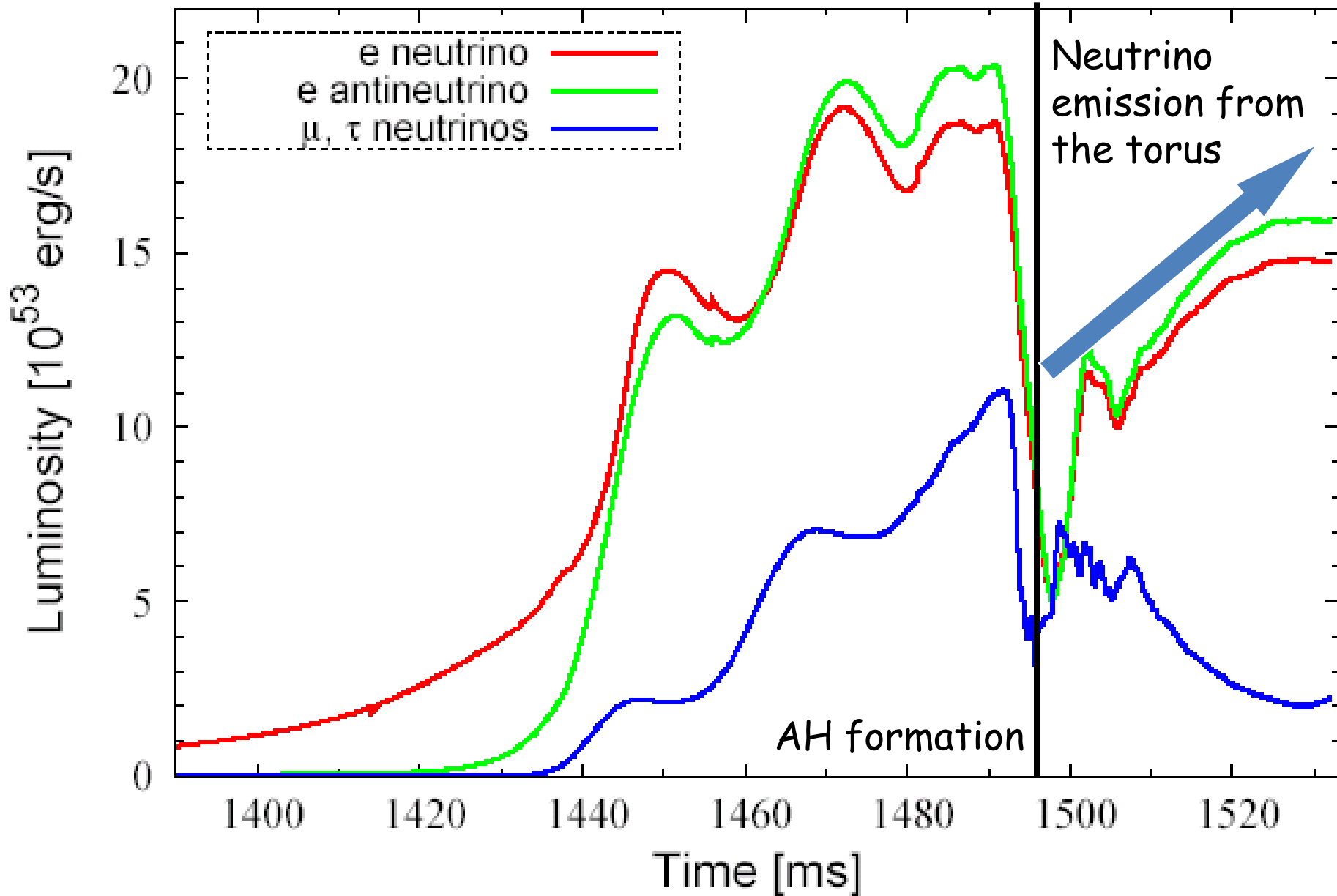
$$\partial_t\gamma_{ij} = -2\alpha K_{ij} + D_i\beta_j + D_j\beta_i$$

$$\begin{aligned} \partial_t K_{ij} = & \alpha[{}^{(3)}R_{ij} - 2K_{im}K_j^m + KK_{ij} - 8\pi S_{ij} + 4\pi\gamma_{ij}(S - \rho_h)] \\ & - D_i D_j \alpha + \beta^m D_m K_{ij} + K_{im} D_j \beta^m + K_{jm} D_i \beta^m \end{aligned}$$





関口さんの



# セントラルエンジン駆動タイミングはどうジェット伝搬に影響するか？

Progenitor Model (Woosley & Heger 2006)  
に近い回転している星の構造を用意  
～回転星の平衡形状～

Wind の定常解をつくる

星の崩壊を計算

Jet伝搬のNumerical Simulation

HydroのdataをBackgroundに  
輻射輸送計算

Movie



# 特殊相対論的弱重力場近似コード

## 基礎方程式

### High Resolution Shock Capturing Scheme

$$\partial_t \rho_* + \partial_j (\rho_* v^j) = 0$$

$$\partial_t S_r + \partial_j (r^2 \sin \theta T_r^j) = r^2 \sin \theta \left\{ -T^{00} \psi_{,r} + r T^{\theta\theta} + r \sin^2 \theta T^{\phi\phi} \right\}$$

$$\partial_t S_\theta + \partial_j (r^2 \sin \theta T_\theta^j) = r^2 \sin \theta \left\{ -T^{00} \psi_{,\theta} + r^2 \sin \theta \cos \theta T^{\phi\phi} \right\}$$

$$\partial_t S_\phi + \partial_j (r^2 \sin \theta T_\phi^j) = 0$$

$$\partial_t \tau + \partial_j (r^2 \sin \theta T^{0j} - \rho_* v^j) = -r^2 \sin \theta T^{0i} \psi_{,i}$$

$$\partial_t (\rho_* A) + \partial_j (\rho_* A v^j) = 0$$

$$\rho_* \equiv r^2 \sin \theta \rho_0 u^t$$

$$S_i \equiv r^2 \sin \theta T_i^0$$

$$\tau \equiv r^2 \sin \theta T^{00} - \rho_*$$

A: 平均分子量

D: 3次元計量の共変微分

$$D_i D^i \psi = 4\pi \rho_0 \left\{ 2h (u^t)^2 - h + 2 \frac{p}{\rho_0} \right\}$$

MICCG (共役勾配法)

EOS : Nadyozhin EOS

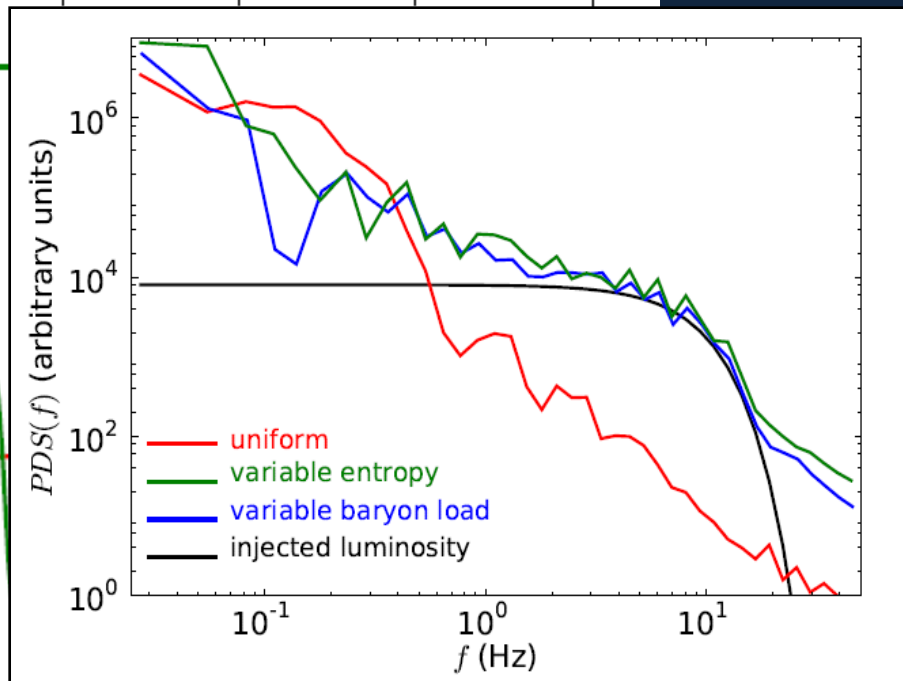
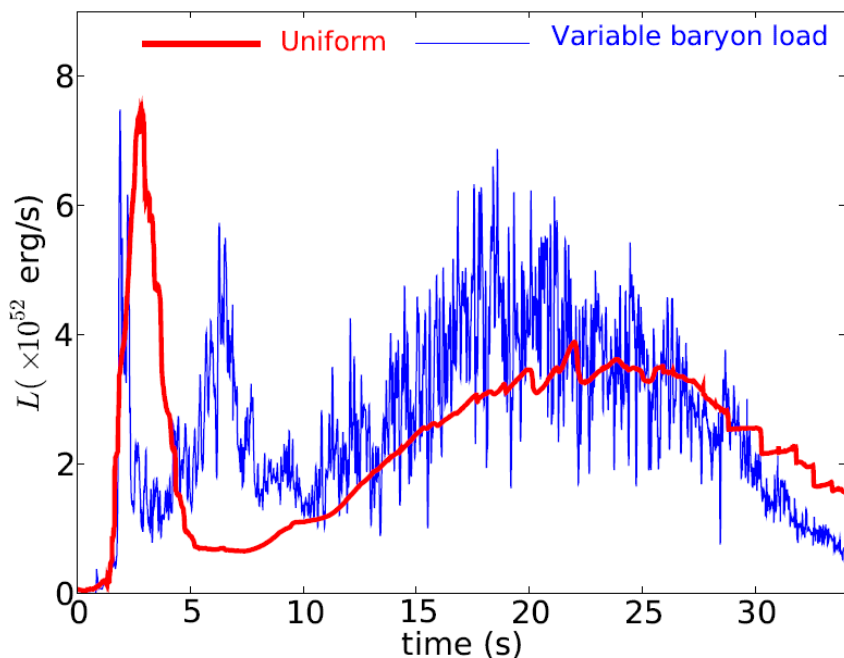




# Time Variable Jet Injection

Morsony et al 2010

$$L_R(t) = c \int_{\Sigma_R} d\sigma (3p + \rho c^2) \Gamma^2 \delta^2$$

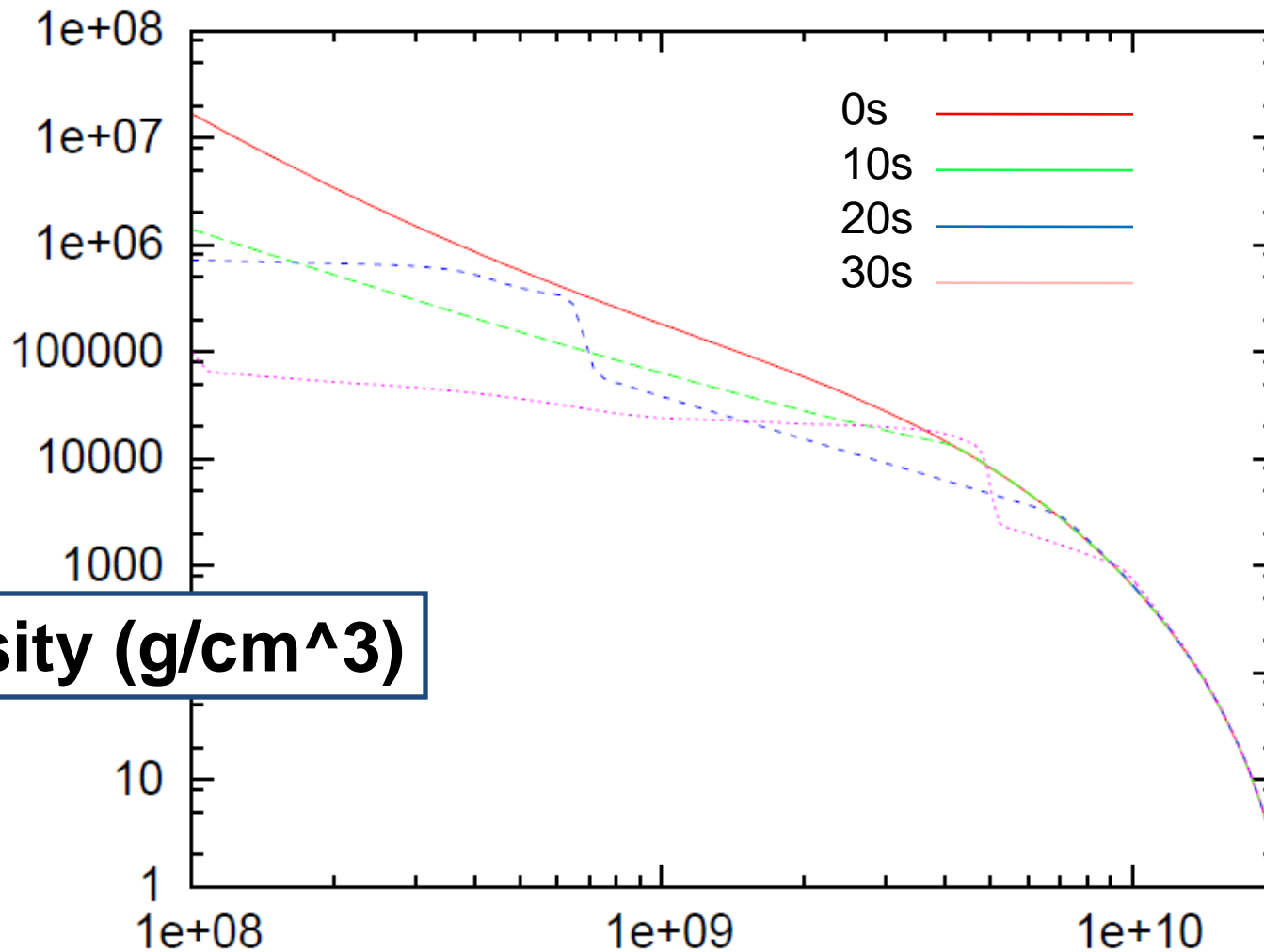


## GRB prompt phase の time variability

長いtime scale の時間変動はJet と progenitor との interaction で決まる

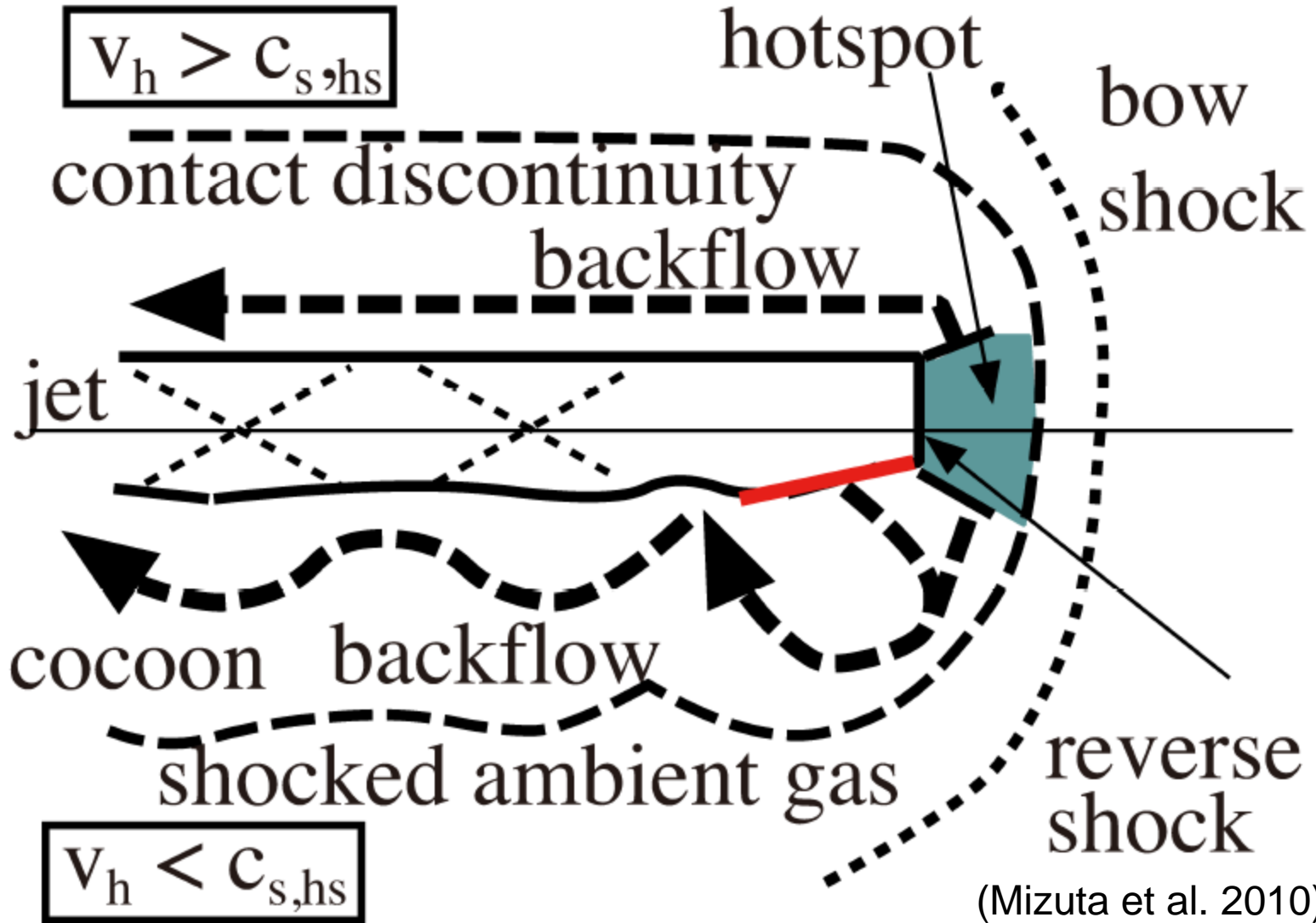
短い方は、中心エンジンの時間変動を反映

# 星の崩壊計算： 密度分布の時間発展



**Density ( $\text{g/cm}^3$ )**

**Radius (cm)**



# Shock Evolution ~ やがて衝撃波は止まってしまう ~

$$E_{\text{shock}} = E_{\text{shock,init}} + \int L_{\text{hydro}} dt - \int (L_{\text{photo}} + L_{\nu}) dt$$

✓

$$L_{\text{hydro}} \propto R_s^2 \rho_f v_f^3 \propto R_s^2 \rho_f (M_{\text{core}}^{\frac{1}{2}} R_{\text{sh}}^{-\frac{1}{2}})^3 \propto \rho_f M_{\text{core}}^{\frac{3}{2}} R_{\text{sh}}^{\frac{1}{2}}$$

✓

$$L_{\text{photo}} \approx \dot{M}_{\text{sh}} \epsilon_{\text{dis}} \propto R_s^2 \rho_f v_f \propto \rho_f M_{\text{core}}^{\frac{1}{2}} R_s^{\frac{2}{3}}$$

✓

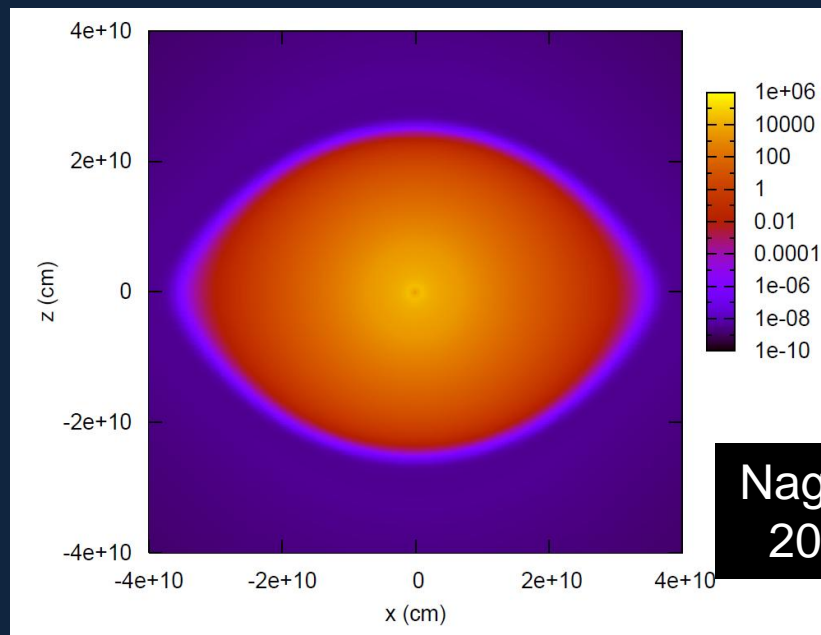
$$L_{\nu} \sim 10^{52} \text{ erg/s} \left( \frac{kT}{4\text{MeV}} \right)^6$$



# Hachisu Self Consistent Field (HSCF) Scheme

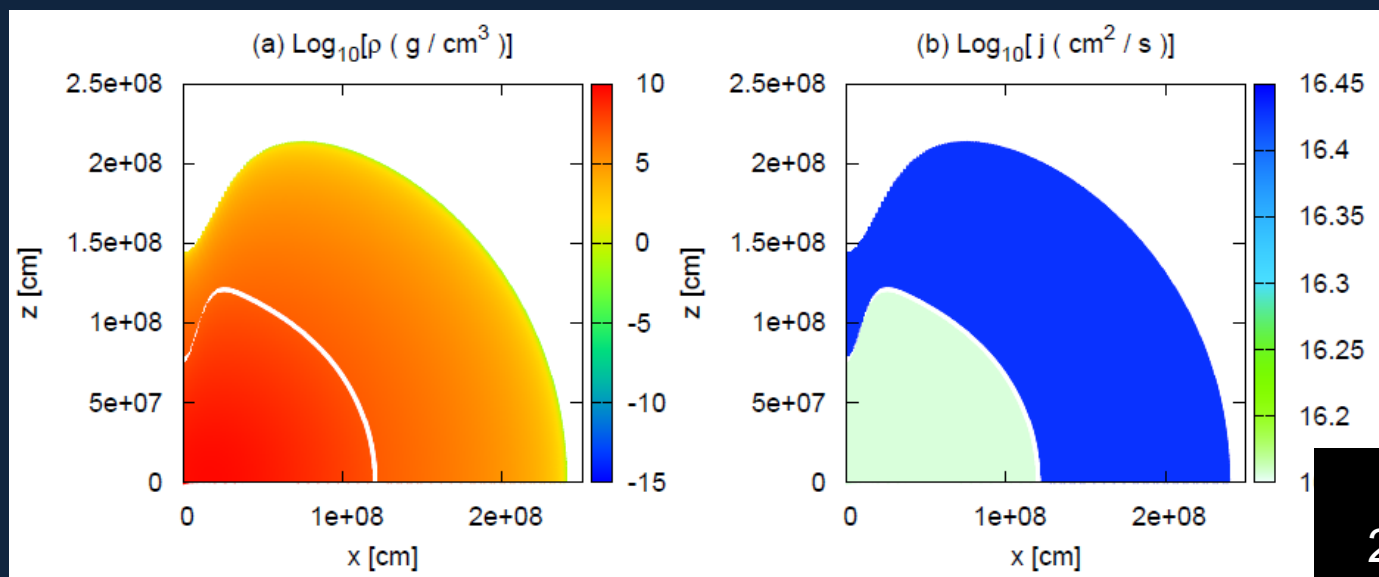
Hachisu (1986)

軸比を与えて、その軸比  
の平衡形状を求める



Nagakura et al  
2010 in prep

## 多層構造における回転星の平衡形状



Kiuchi et al  
2010 in prep



$$\text{(layer 1 side at } E_{12}) \quad \frac{\beta}{p_{\max}} H_{(1)}(p(r_{E_{12}}, \pi/2)) = -\phi_g(r_{E_{12}}, \pi/2) + h_{0(1)}^2 \phi_{\text{rot}}(r_{E_{12}} : A_{(1)}) + c_{(1)},$$

$$\text{(layer 2 side at } E_{12}) \quad \frac{\beta}{p_{\max}} H_{(2)}(p(r_{E_{12}}, \pi/2)) = -\phi_g(r_{E_{12}}, \pi/2) + h_{0(2)}^2 \phi_{\text{rot}}(r_{E_{12}} : A_{(2)}) + c_{(2)},$$

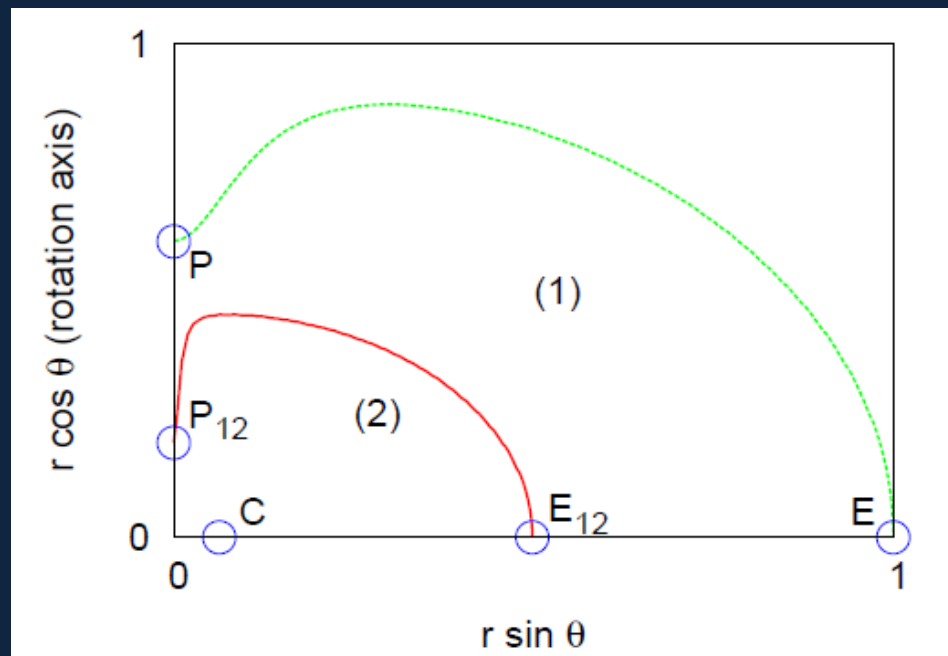
$$\text{(layer 1 side at } P_{12}) \quad \frac{\beta}{p_{\max}} H_{(1)}(p(r_{P_{12}}, 0)) = -\phi_g(r_{P_{12}}, 0) + h_{0(1)}^2 \phi_{\text{rot}}(0 : A_{(1)}) + c_{(1)},$$

$$\text{(layer 2 side at } P_{12}) \quad \frac{\beta}{p_{\max}} H_{(2)}(p(r_{P_{12}}, 0)) = -\phi_g(r_{P_{12}}, 0) + h_{0(2)}^2 \phi_{\text{rot}}(0 : A_{(2)}) + c_{(2)},$$

$$(E) \quad 0 = -\phi_g(1, \pi/2) + h_{0(1)}^2 \phi_{\text{rot}}(1 : A_{(1)}) + c_{(1)},$$

$$(P) \quad 0 = -\phi_g(r_p, 0) + h_{0(1)}^2 \phi_{\text{rot}}(0 : A_{(1)}) + c_{(1)},$$

$$(C) \quad \frac{\beta}{p_{\max}} H_{(i)}(\rho_{\max}) = -\phi_g(r_C, \pi/2) + h_{0(i)}^2 \phi_{\text{rot}}(r_C : A_{(i)}) + c_{(i)}. \quad (i = 1 \text{ or } 2)$$



# セントラルエンジンの 開始時間、継続時間、終了時間



ジェットの伝搬に影響



GRB本体にも影響

後述

GRB本体のDuration  
+  
Failed GRBは  
どのぐらいあるか？

Shallow Decay  
+  
X-ray Flare

## 超新星爆発との関係

Disk Wind?? Cocoon Explosion?? その他のメカニズム??