

コラプサーからのガンマ線バーストジェット

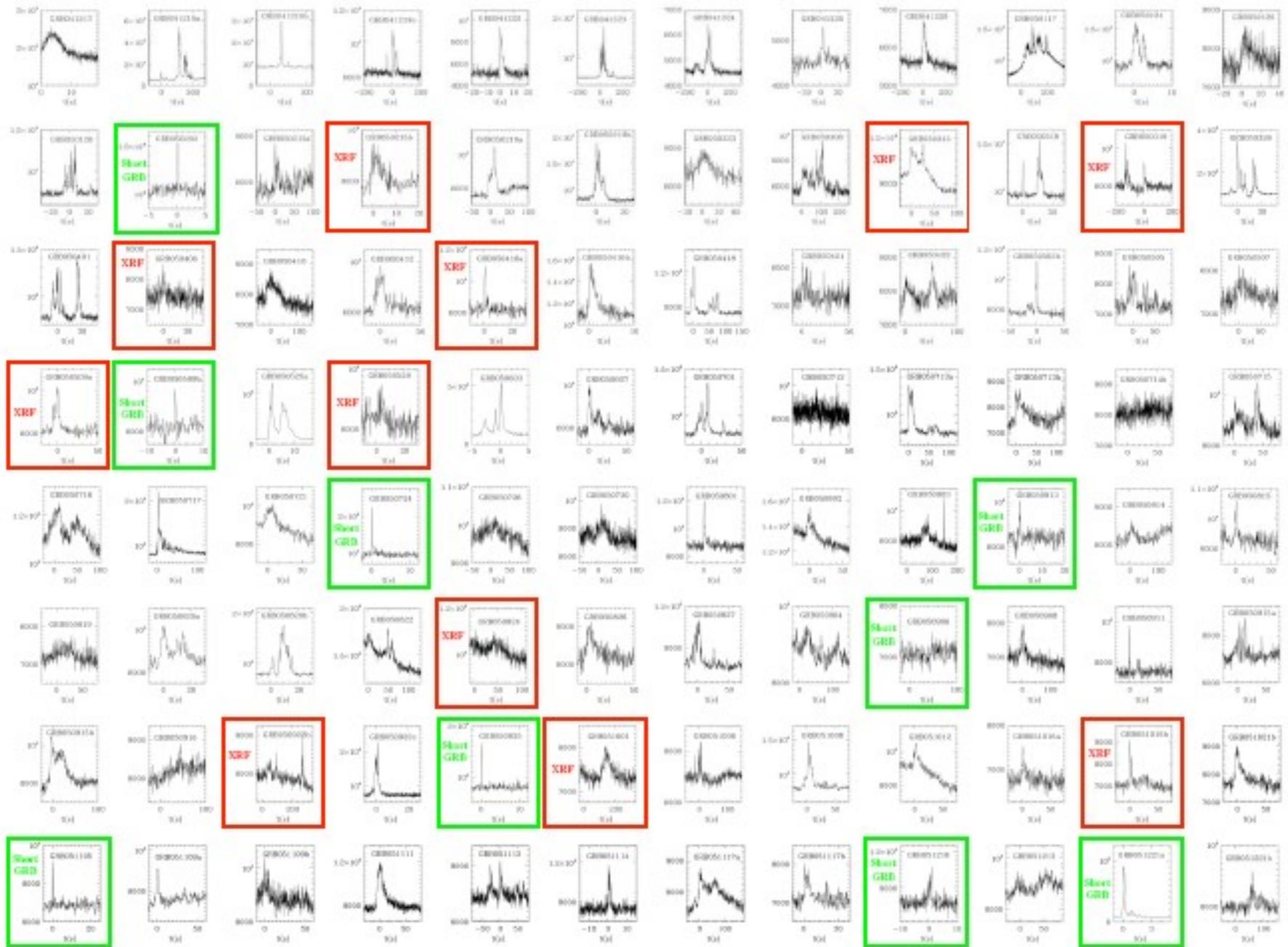
水田 晃（千葉大）

1. Introduction
observation and theory of GRB
GRB と 超新星爆発
2. コラプサーからの相対論ジェット
親星からブレイクしたその後
3. まとめ

12.26.2006

第19回理論懇シンポジウム
@立教大学

GRBs detected by Swift



By N. Gehrels

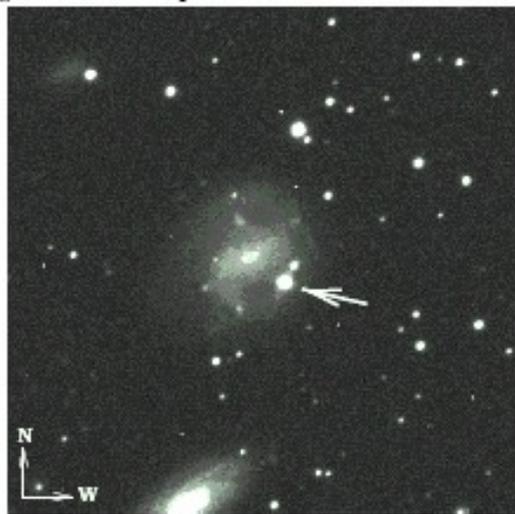
超新星爆発とGRB

ロングGRBと超新星爆発の相関が数例観測された。

ex. GRB980425/SN1998bw,
GRB030329/SN2003dh

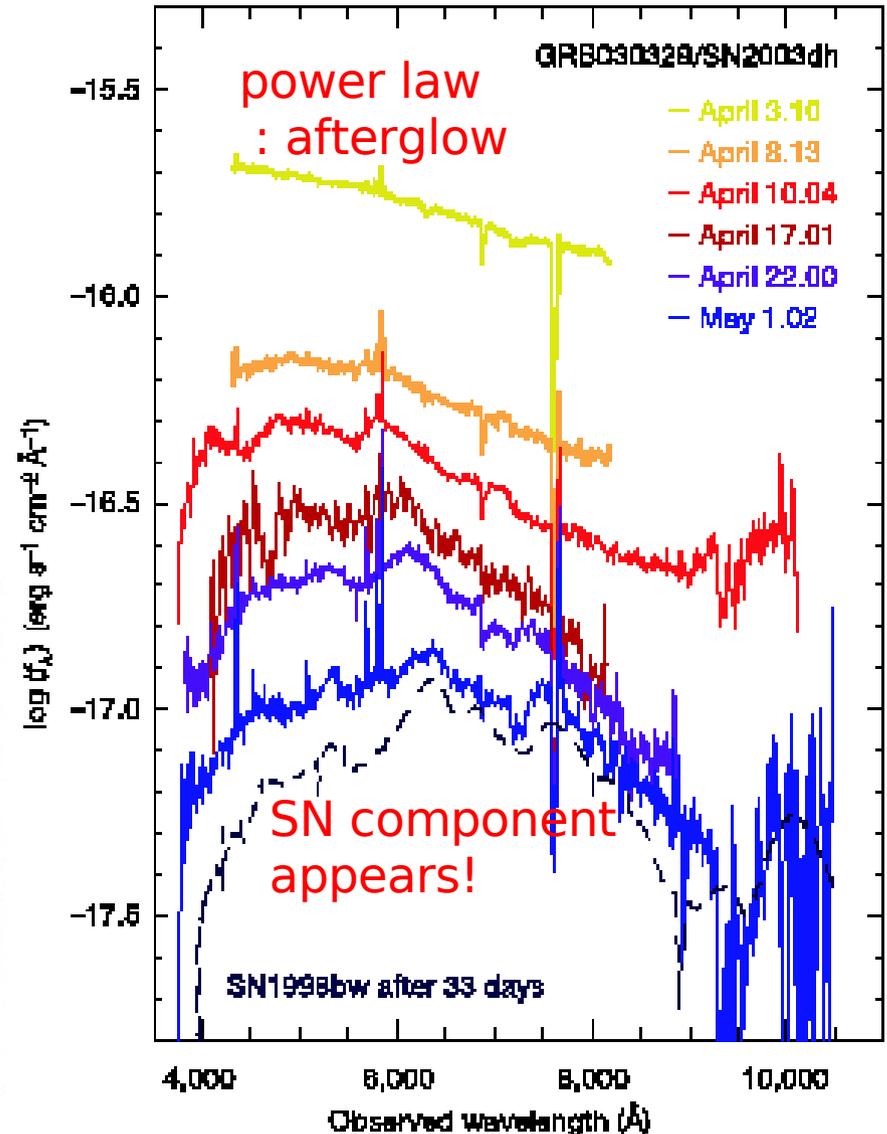
共に爆発エネルギーは通常の超新星爆発よりも大きい**極超新星**

$E=10^{52}$ erg 通常よりも大量の ^{56}Ni の生成



SN1998bw/GRB080425

Spectrum :after a few days
~ after a month from the burst



GRB の母銀河は星形成銀河
GRB にはHNが必要と思われたが。。。。

SN2006aj GRB060218(XRF)

Type Ic の超新星

$z=0.03342$ 2番目に近いGRB

ejecta 2 solar mass
(10 solar mass for GRB-SN)

爆発エネルギー

2×10^{51} erg

(3×10^{52} erg for GRB-SN)

バーストの中に熱的成分

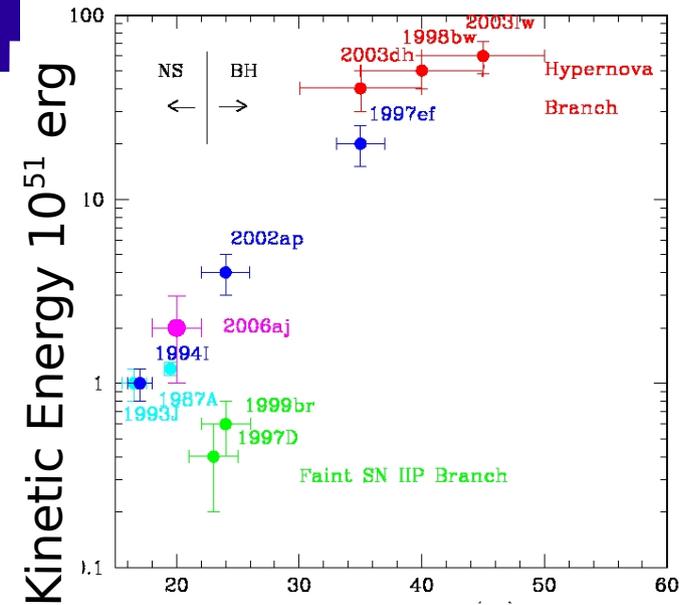
XRF で初めてSNとの相関が観測された
中性子星が形成された？

Mazzali et al. (2006) 他 in nature

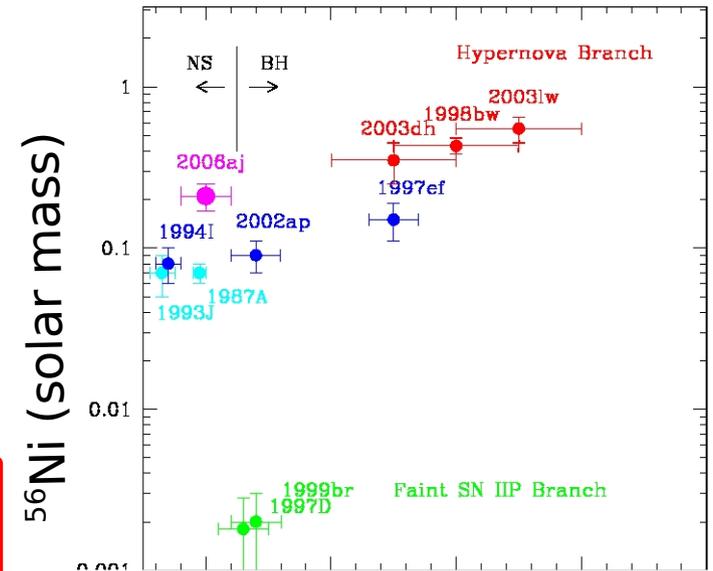
GRB060505 at $z=0.089$ (4s)

GRB060614 at $z=0.125$ (102s)

近傍のGRBなのにSNが観測されなかった
新しいタイプの大質量星の死？



Mass of Progenitor (solar mass)

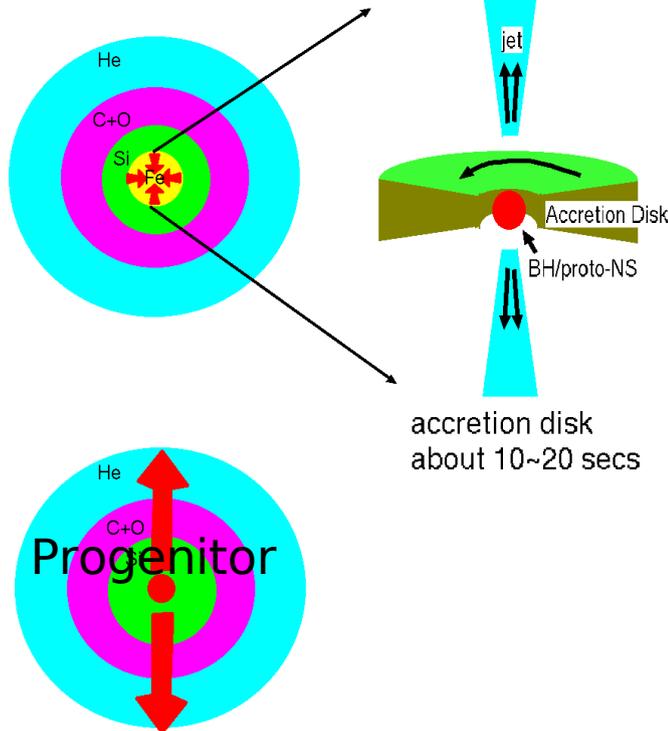


Mass of Progenitor (solar mass)

Nomoto 2003,
Mazzali (2006 改変)

”Collapsar モデル” 高速回転する大質量星の死 (Wooseley 1993, Paczynski 1998, MacFadyen et al. 1999)

Shell structure



1. Fe core が崩壊し親星中心にブラックホール又は原始中性子星が形成される

2. 親星は高速回転している為、回転軸方向には外層は自由落下できるが赤道方向は強い遠心力を受け、降着円盤が形成される

ニュートリノ、反ニュートリノの対消滅 and/or MHD プロセスによるジェットの形成

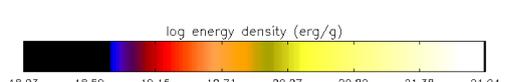
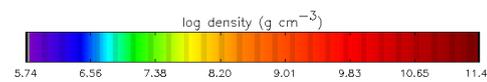
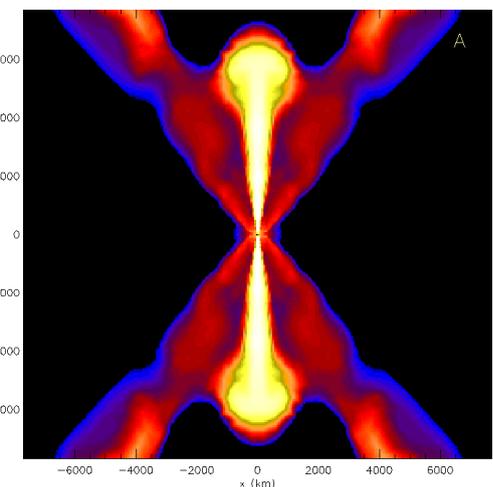
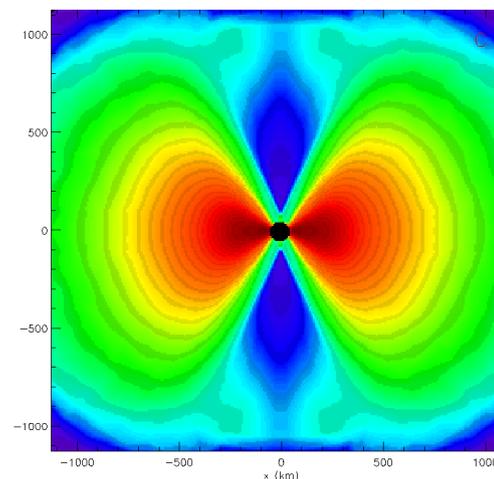
ニュートリノ、反ニュートリノの対消滅を仮定して熱エネルギーを極付近に注入。ホットプラズマが回転軸方向に膨張していく

==> GRB ジェット

磁気駆動型のシミュレーション

Mizuno et al. Proga et al.

Nagataki et al.



”Collapsar モデル” の課題

アウトフローの形成機構（中心エンジン）

どのような親星がGRBジェットを形成できるか？

Woosley & Heger (2006), Yoon et al. (2005)

星の進化において、初期の角運動量、金属汚染、mass loss, ダイナモなどを考慮

ニュートリノ、反ニュートリノの対消滅？
磁気駆動型？

アウトフローが形成された後、どのように親星中を伝搬してゆくか？
GBR を伴うものと、伴わないものの違いは？

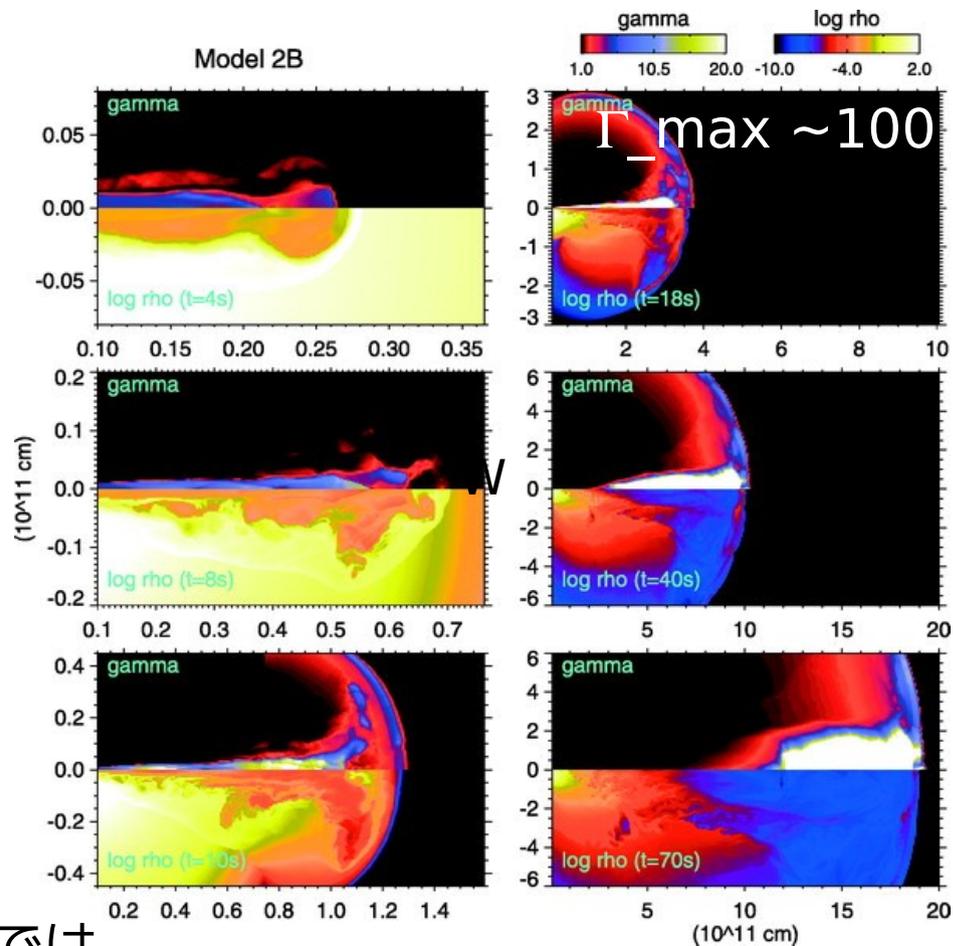
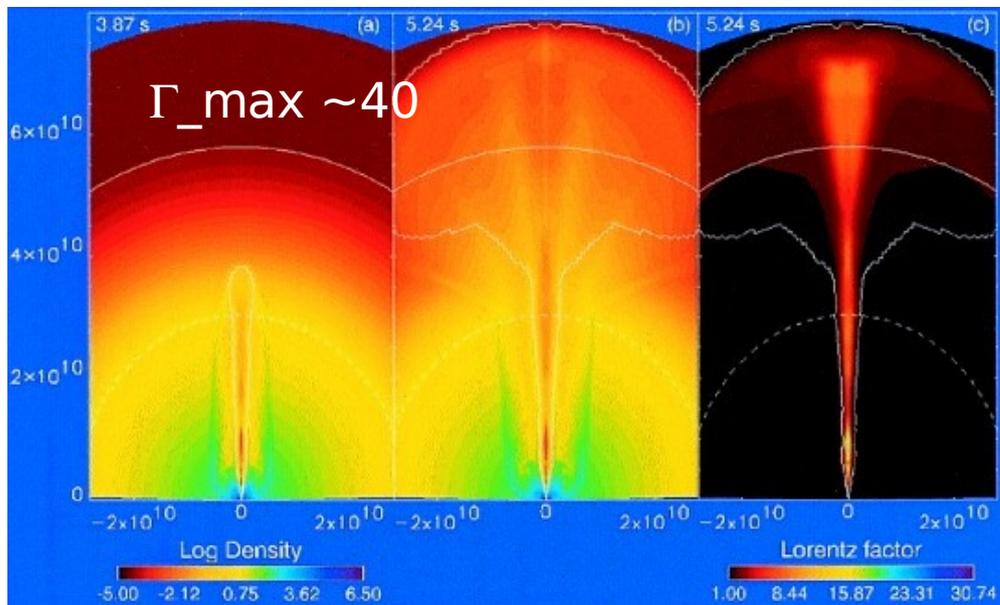
最近の”特異”なGRBはコラプサーモデルの枠で説明可能か？

アウトフロー形成のフェーズから、残光フェーズまでは、
空間スケールだけでも10桁も変化。

全体をまとめてとらえるのは難しい。

各パートを取り出してモデルを作り、繋げていく段階。

相対論的流体シミュレーションによるコラプサーモデルの計算 相対論的ジェットは形成されるか？どのように伝搬するか？



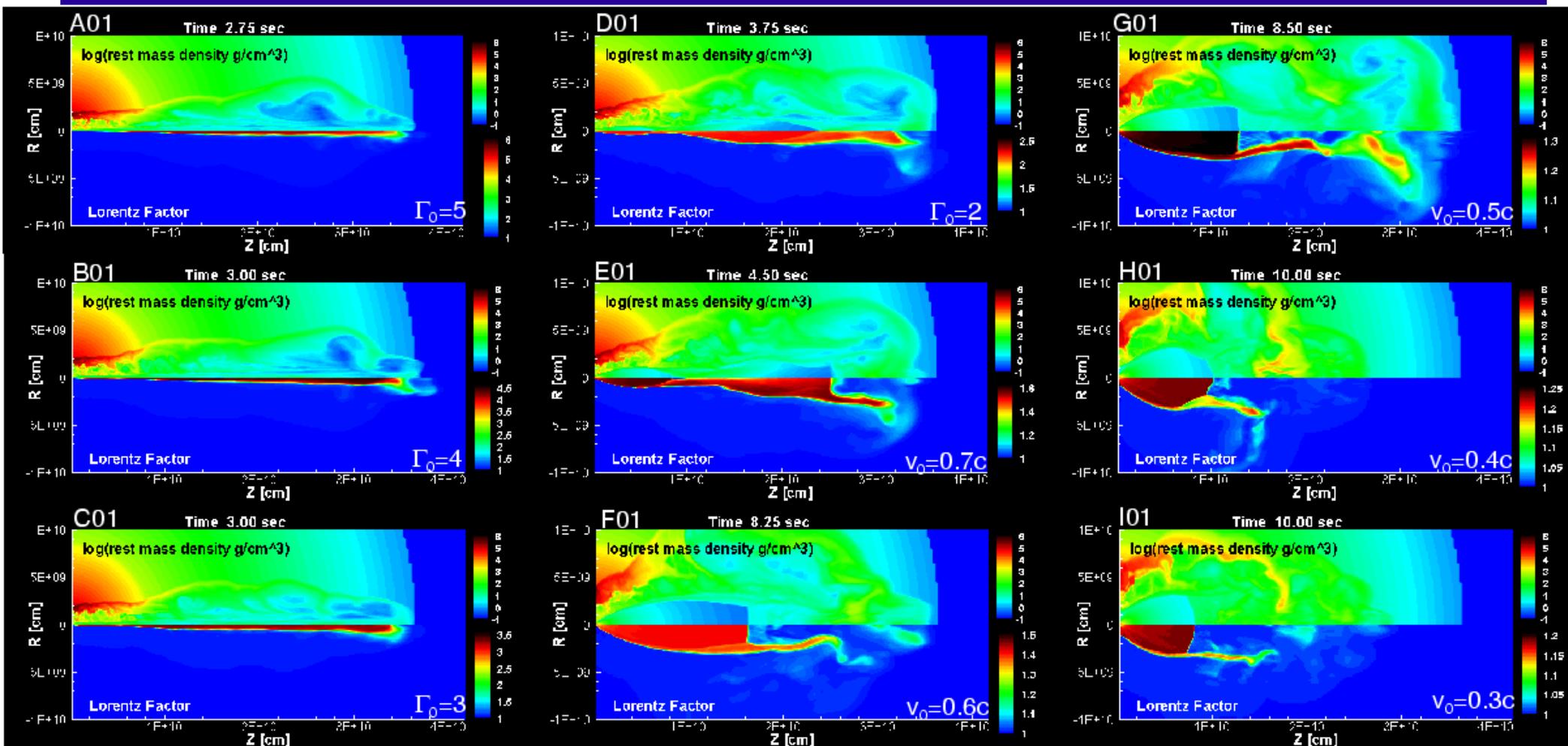
Aloy et al. (ApJL 2000)
MacFadyen et al. (1999) と同じだが
相対論的流体シミュレーション

バイナリ NS の合体を仮定した同様の計算では
G~数百を実現 Aloy et al.(2005)

Zhang et al. (a jet injected)

これらのシミュレーションでは親星の中を相対論的ジェットが伝搬し、
親星を付き破った後 GRB と成りうるアウトフローが見られる

アウトフローの初期の速度、熱エネルギーによって、
高ローレンツ因子、収束したジェットから大きく広がっていく
アウトフローまで、多様な振舞がみられた



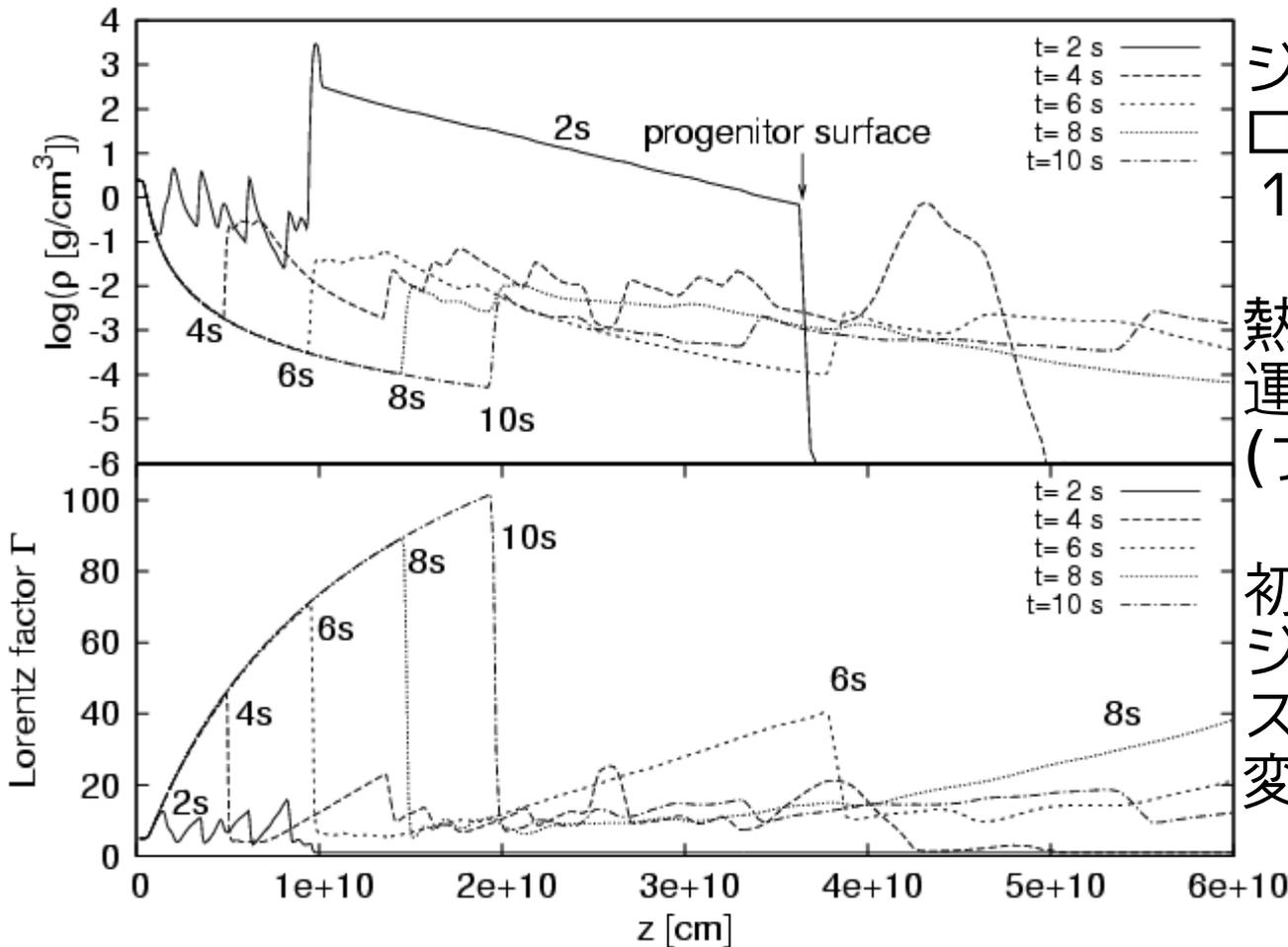
$dE/dt = 10^{51} \text{erg/s}$ for 10 sec, $\epsilon_0/c^2 = 0.1$.

Mizuta et al.(2006)

Outflow is initially parallel to cylindrical axis

The other series ($\epsilon_0/c^2 = 1.0, 5.0$) also show the same transition.

初期に十分な熱エネルギーを持ったモデルでは
ローレンツ因子 100 を越えるアウトフローが見られる



ジェットの軸に沿った密度と
ローレンツ因子の
1次元プロフィール

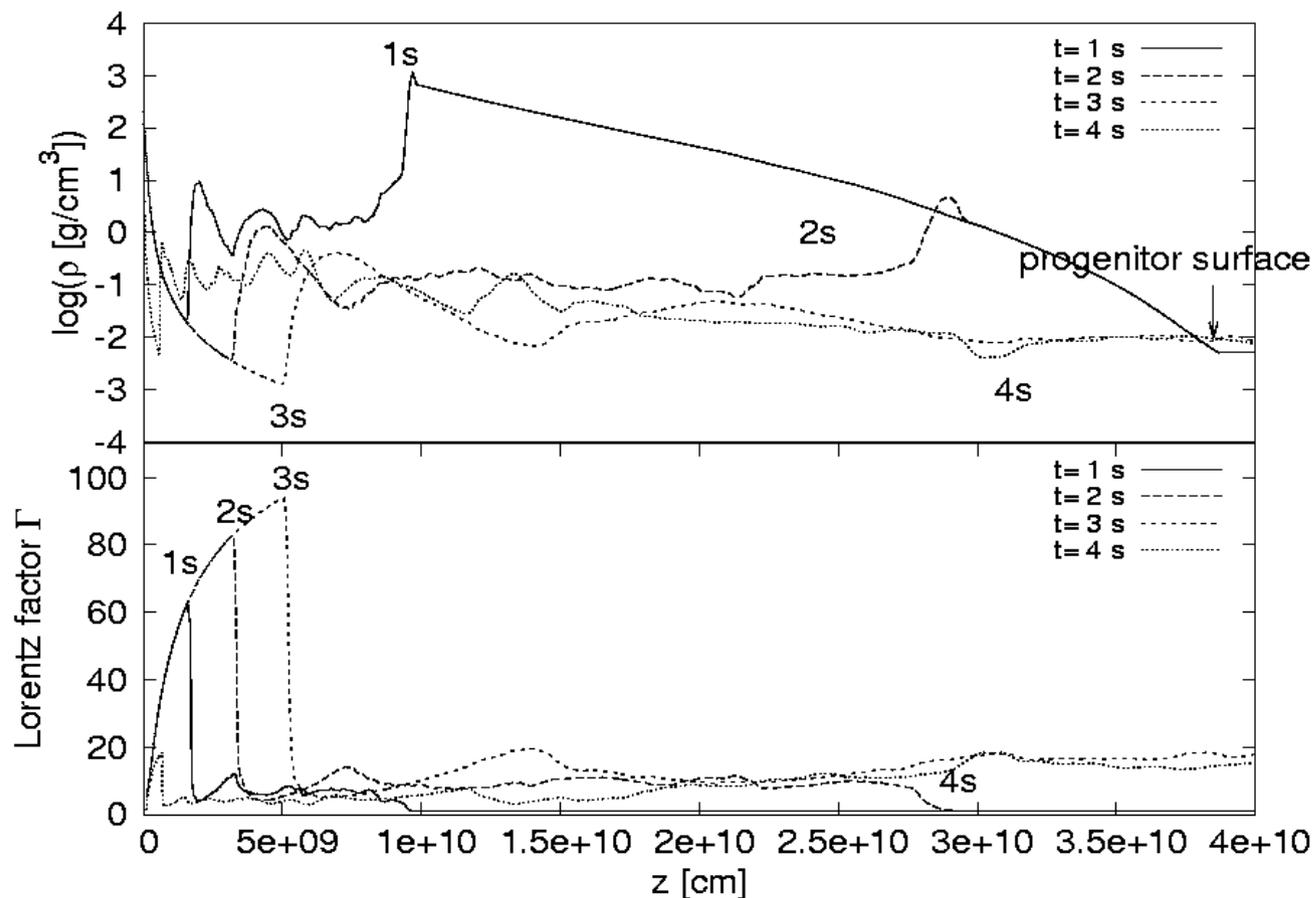
熱エネルギーが膨張によって
運動エネルギーに変換される
(ファイアボールモデル)

初期は、親星の高密度中を
ジェットが広がっていく
スペースを作る仕事をする為、
変換効率は悪い。

Maximum Lorentz factor is good agreement with
simple formula

$$\Gamma_{\max} \sim \Gamma_0 (1 + \varepsilon_0 / c^2) \quad \text{この場合は} \quad \Gamma_0 = 5, \varepsilon_0 / c^2 = 30$$

初期の開き角と加速 ($\theta_0 = 5^\circ$ の場合)

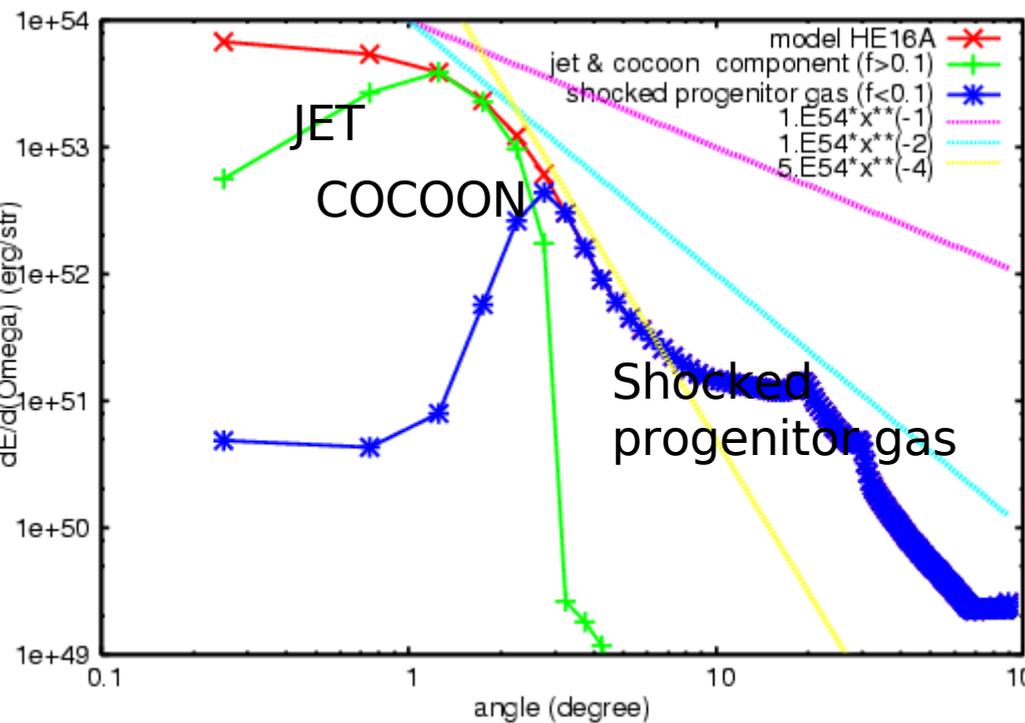


先ほどと注入ジェットの状態はほぼ同じ。

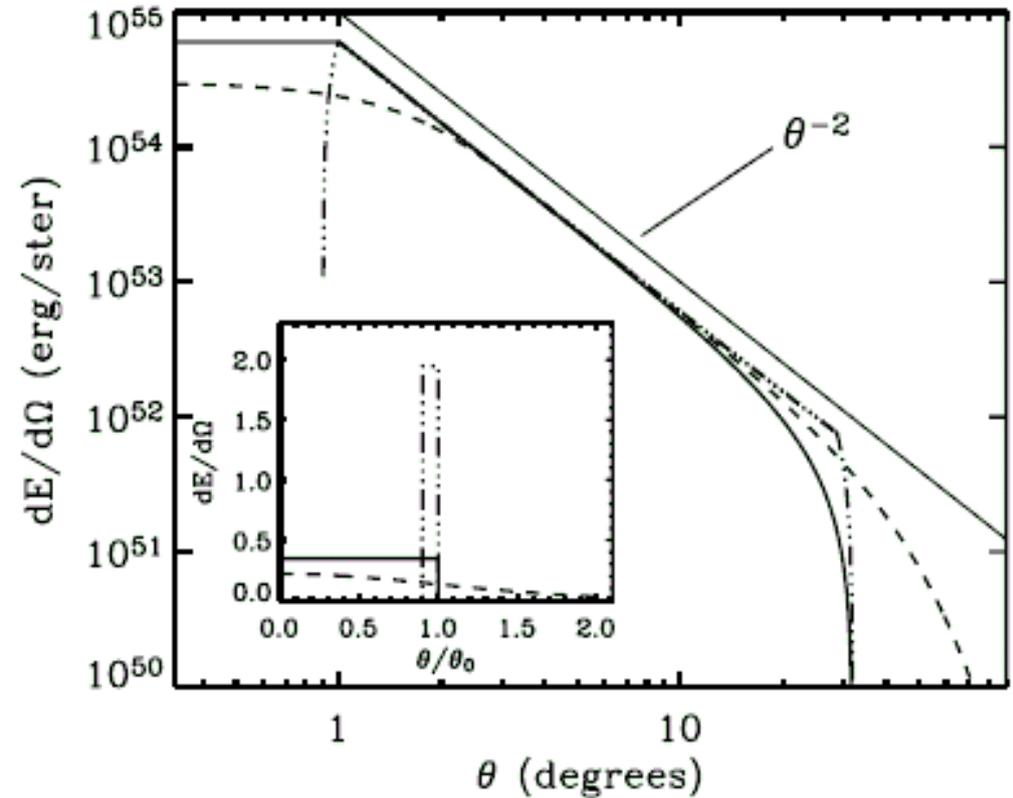
初期に開き角を持った ($\theta = 5^\circ$) アウトフローは、横方向へ広がる仕事をしなくていい分、早く高ローレンツ因子を実現できる

初期の開き角、中心エンジン（降着円盤）の活動の持続時間が、高ローレンツ因子の成分を得るには重要となってくる

“Energy distribution in angle” ブレイクの後 Lazzati & Begelman (2005) との比較



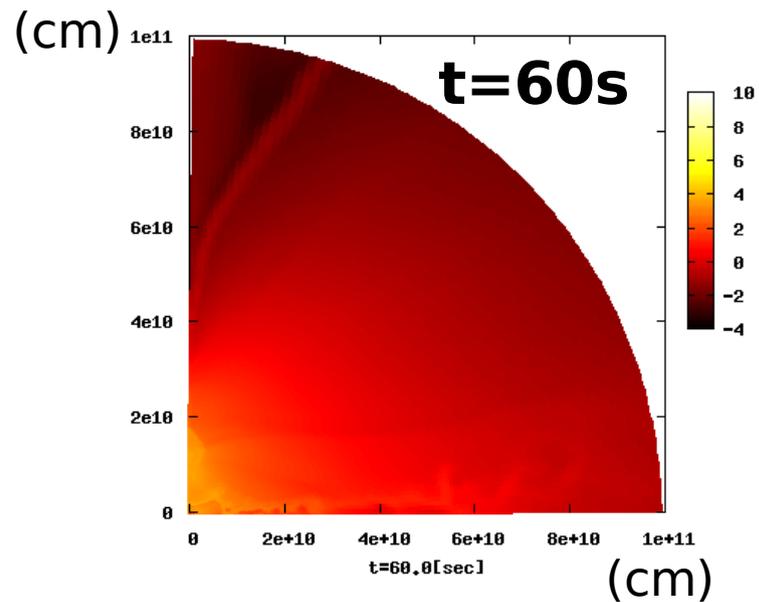
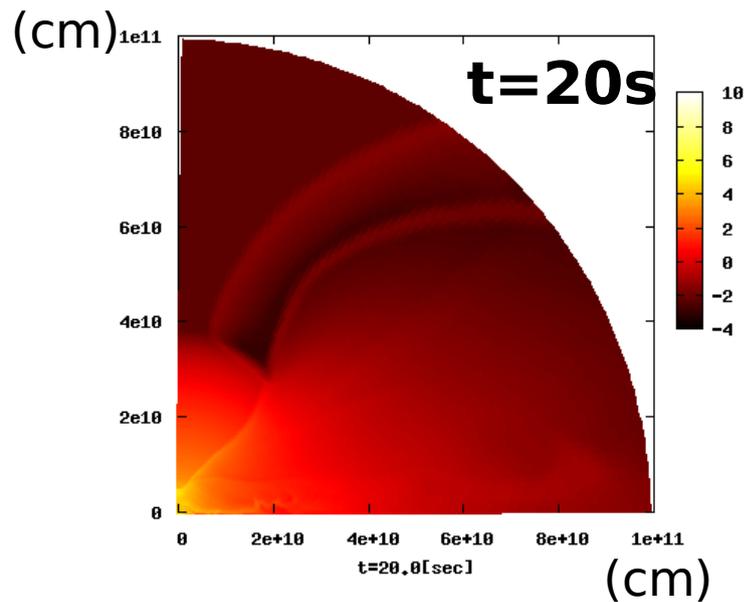
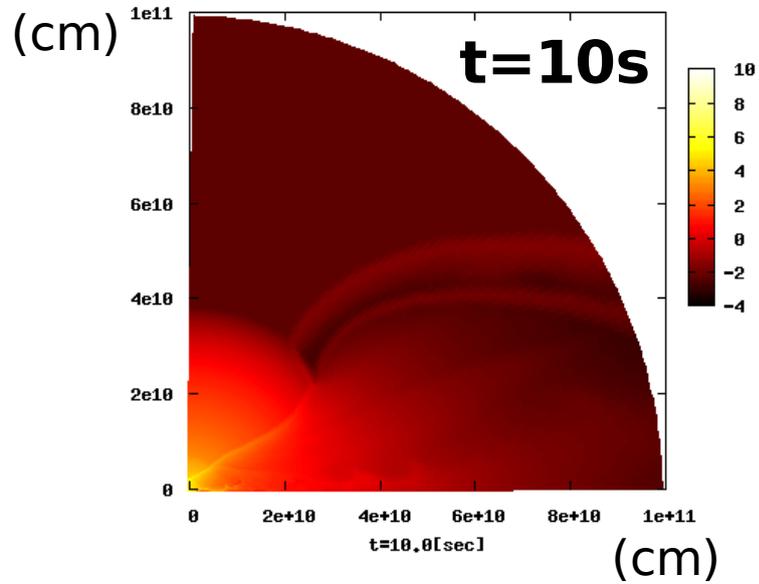
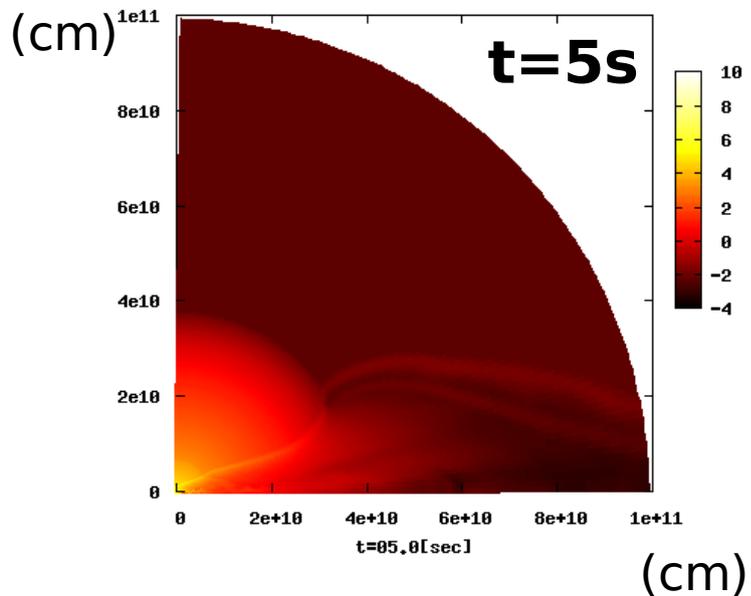
Lazzati & Begelman (2005) で導出された理論モデル



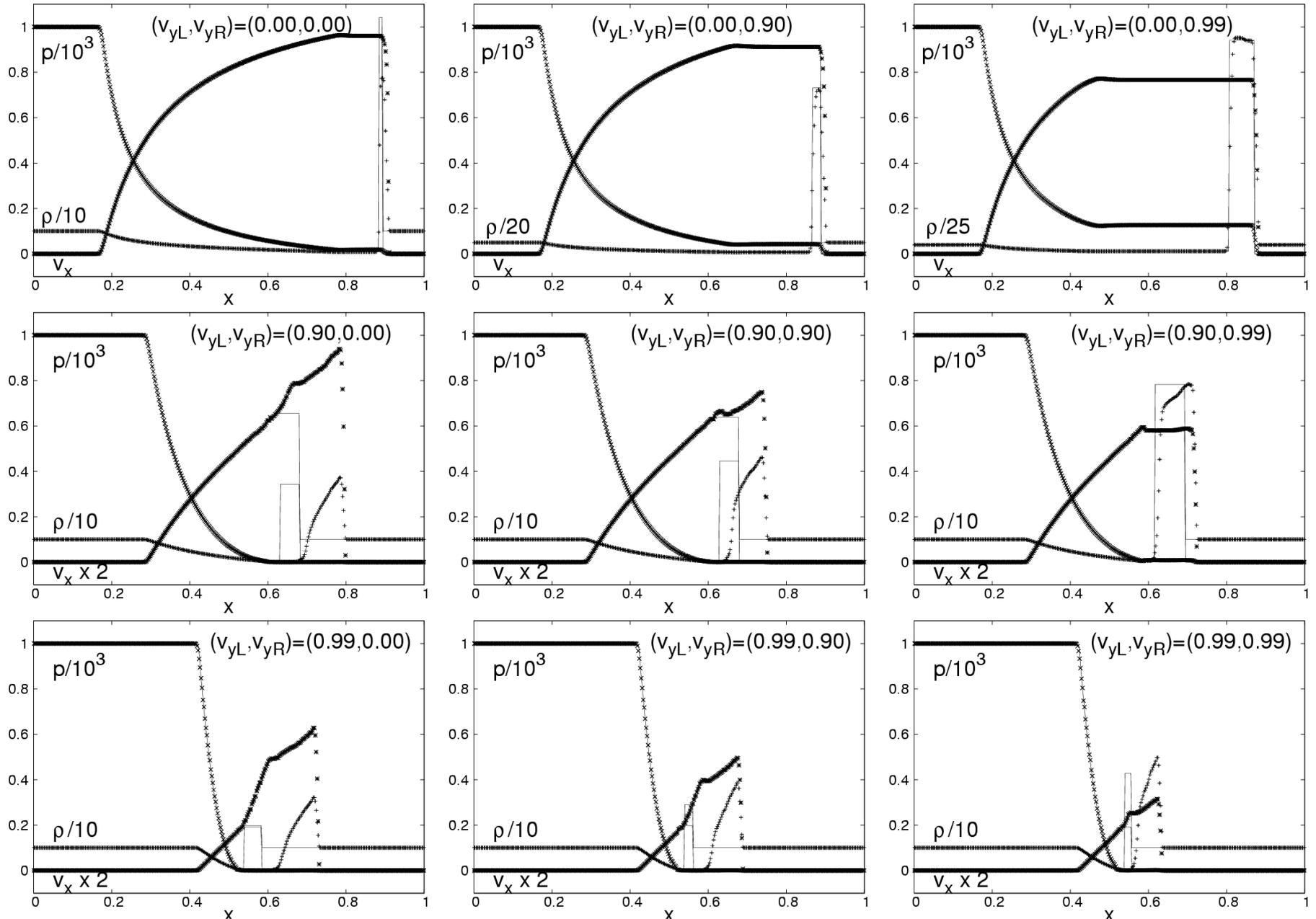
Woosley & Heger(2006) で紹介された16の親星モデルでも同様の傾向が得られた。

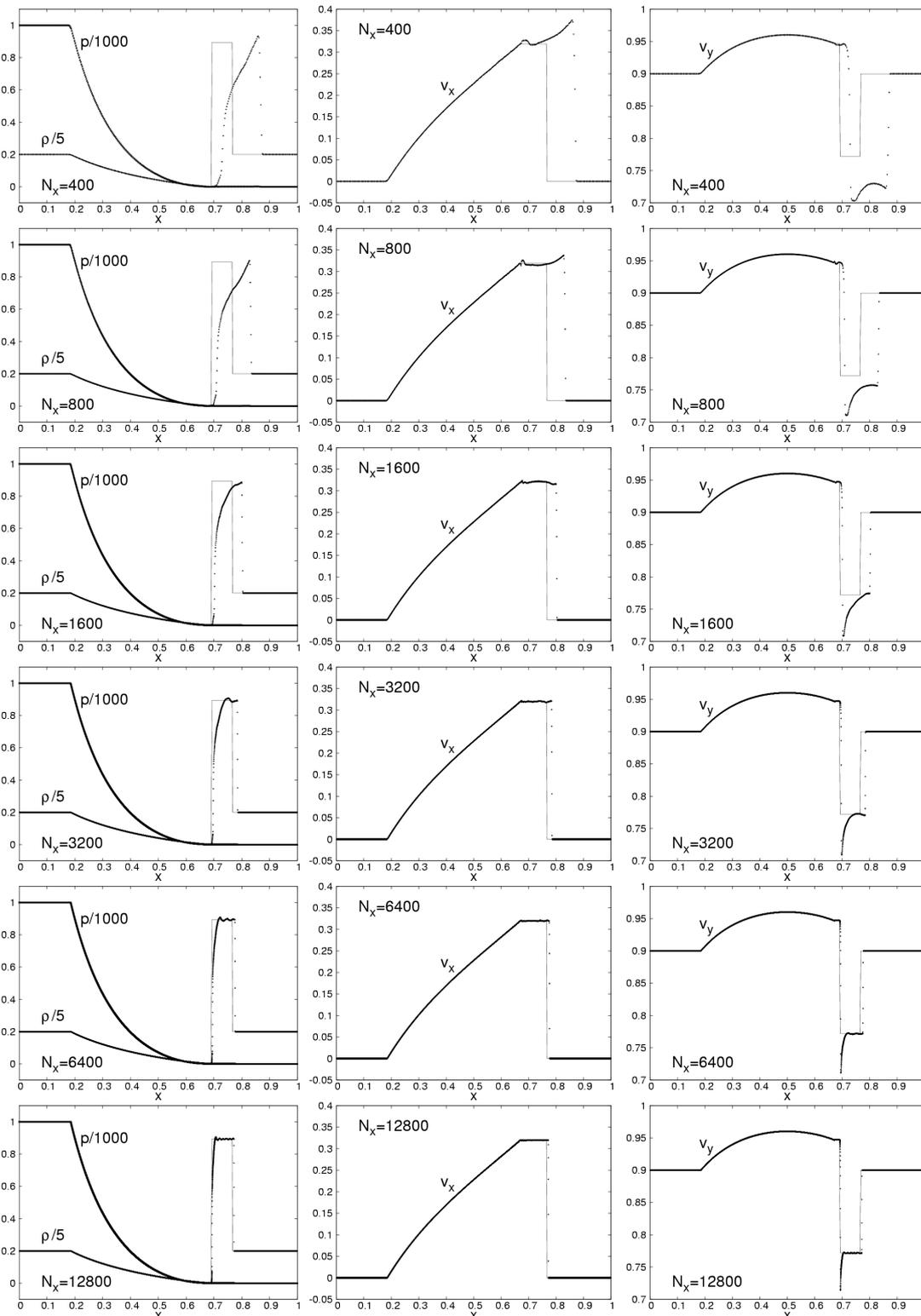
Lazzati らも流体シミュレーションで同様の結果を得ている

中心エンジンからのアウトフローが無くなった後でも親星中の横方向の衝撃波は残る



相対論的流体シミュレーションの問題点 $\Gamma = (1 - v_x^2 - v_y^2)^{-1/2}$ (衝撃波の進行方向に対して垂直方向成分の効果)





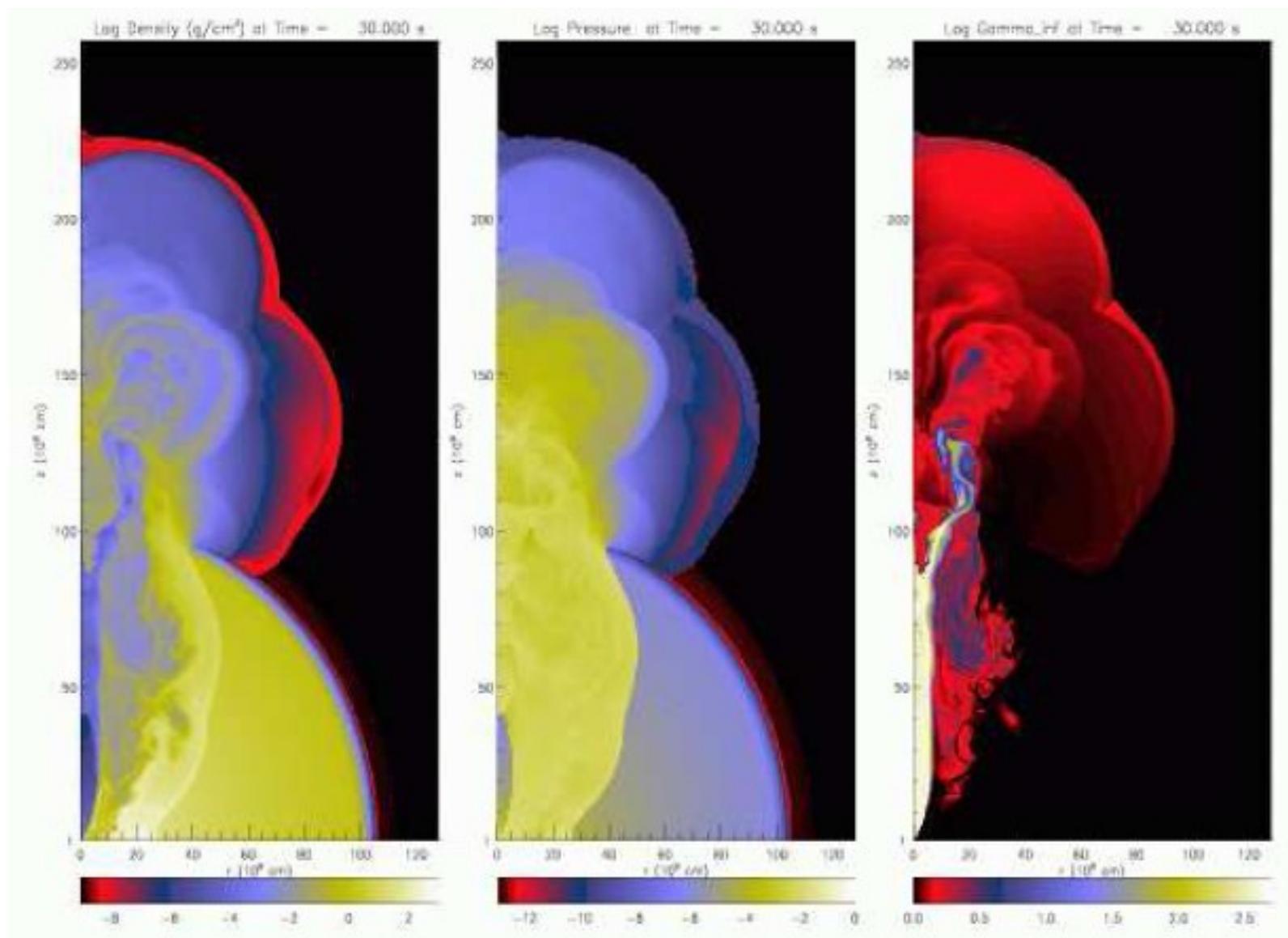
既存のコードでは、
(近似)リーマン解に
transverse velocity の効果が
含まれていない

解決策

1. **高解像度**にする
時間的、空間的に必要な
部分にローカルに
メッシュを多く切る
(AMR: Adaptive Mesh
Refinement)
- FLASH code (Chicago Univ.)
RAM code (by Zhang et al.)
2. **transverse velocity の
効果が含まれたリーマン解**を
用いる---開発されていない

AMR は計算コストがかかる為、
根本的解決が望まれる

AMR (最大12レベル) を用いたGRBジェットのスミュレーション Morsony, Lazzati, & Begelman (submitted)



まとめ

コアプサーからのジェットは親星を突き抜け収束を保ちながら星間空間へ進むことができる。
初期の速度によっては、横方向に大きく広がり非相対論的流れで非対象超新星爆発となるようなアウトフローが見られた

高ローレンツ因子を保にはある程度の中心エンジンの持続時間が必要
初期の開き角によって、高ローレンツ因子が達成されるまでの時間は大きく変化する

ブレイク後のコクーンの広がりによるエネルギー分布は

AMR を取り入れた高解像度の相対論的ジェットのシミュレーションが行われ始めている。
同様のコードを開発するには、要時間、
計算コストも高く、エラーの少ないリーマン解を用いるなどの工夫が必要