３次元流体計算による
超新星爆発シミュレーション

滝脇知也
国立天文台天文シミュレーションプロジェクト
特任助教

課題３
「超新星爆発およびブラックホール誕生過程の解明」

National Astronomical Observatory of Japan

Center for Computational Astrophysics

K computer

分野５と超新星爆発、重要性

ビッグバン
構造形成（課題4）
星形成

銀河形成へFB

次世代観測機器

核力（課題１）
原子核（課題2）
ニュートリノ

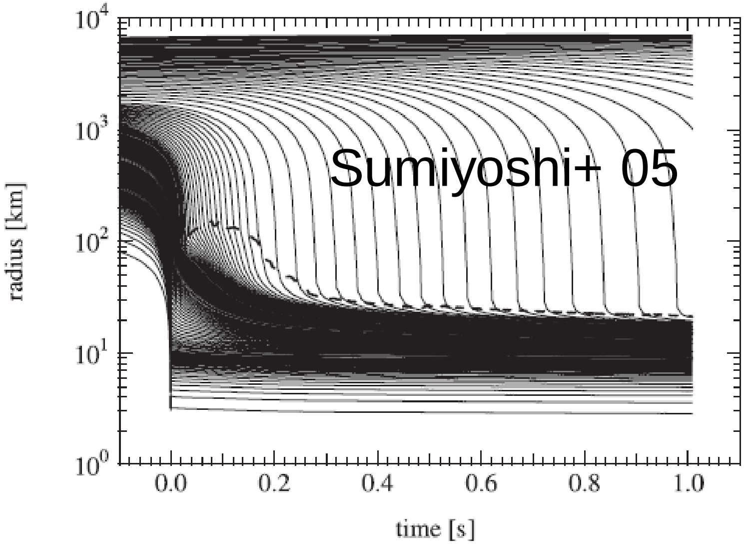
超新星爆発（課題3）

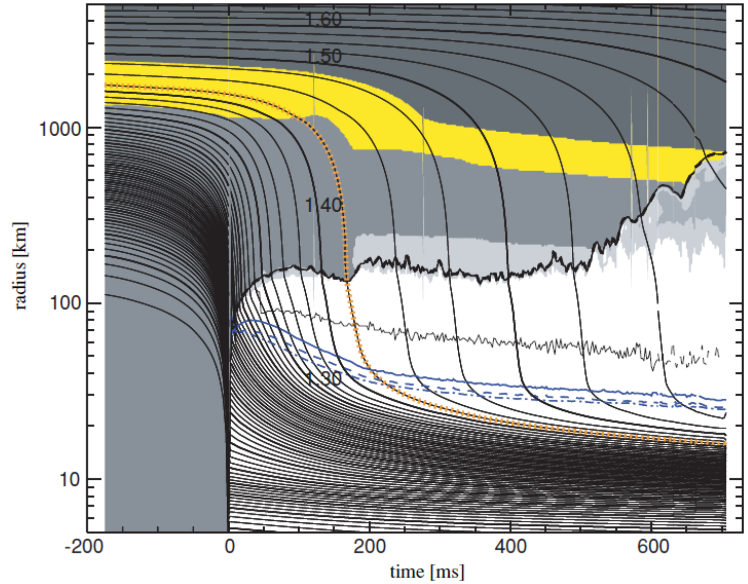
分野5、総動員で挑む課題！

超新星爆発の研究の現状

- 星の形状を球対称を仮定
  ＝＞超新星は爆発しない
- 星の形状を軸対称に仮定
  ＝＞爆発することもある
  　＝＞対流が重要である
- 軸対称の対流は不自然
  ＝＞３次元では？

京の重点配分枠の優先課題、7課題に選ばれて計算した！





Marek & Janka 2009

京の良いところ、悪いところ

長所

- **やっぱり大きい**(2048node(250Tflops)**で**20**日の計算**, 250TFlops)
- **分かりやすいプロファイラ**
- **わりと大きい**B/F(=0.4)

短所

- HDD**まわり（事故、頻繁な仕様変更）**
- **スケジューラ（不便、理不尽、最近改善）**
- **ステージング（面倒、エラー）**
- **バグや未最適な関数、ライブラリが？（マニアックなものには注意）**

超新星爆発のシミュレーション

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} &= 0 \\
\frac{\partial \rho Y_e}{\partial t} + \nabla \cdot \rho Y_e \mathbf{v} &= \left(\frac{\delta \rho Y_e}{\delta t}\right)_\nu \\
\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e + p)\mathbf{v} &= \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi + \left(\frac{\delta e}{\delta t}\right)_\nu \\
\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}\mathbf{v} + p\mathbf{I}) &= \rho \nabla \Phi + \left(\frac{\delta \rho \mathbf{v}}{\delta t}\right)_\nu
\end{aligned}
$$

＋ニュートリノの輸送の式

＋一般相対論的効果あるいは磁場

$p\left(\rho, Y_e, T\right)$

密度、電子の数、温度

鉄、ヘリウムの光分解

核密度に達したときの反発

$\mu_e, \mu_n - \mu_p, X_n, X_p, X_{\mathrm{He}}$
$X_{\mathrm{heavey}}, A, Z$

ニュートリノと原子核、電子との反応を計算するため

特徴：圧力、ニュートリノとのエネルギーのやり取り

輻射輸送の解法

$$\frac{1}{c}\frac{\partial f^{\rm in}}{\partial t} + \frac{\mu_\nu}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2 f^{\rm in}) + \frac{\sqrt{1-\mu_\nu^2}\cos\phi_\nu}{r\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}(\sin\theta f^{\rm in})$$
$$+ \frac{\sqrt{1-\mu_\nu^2}\sin\phi_\nu}{r\sin\theta}\frac{\partial f^{\rm in}}{\partial\phi} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\mu_\nu}\left[(1-\mu_\nu^2) f^{\rm in}\right]$$
$$- \frac{\sqrt{1-\mu_\nu^2}}{r}\frac{\cos\theta}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\phi_\nu}(\sin\phi_\nu f^{\rm in}) = \left[\frac{1}{c}\frac{\delta f^{\rm in}}{\delta t}\right]_{\rm collision}$$

$$f^{\rm in}(r, \theta, \phi, t; \mu_\nu, \phi_\nu, \varepsilon^{\rm in})$$

６次元のボルツマン方程式

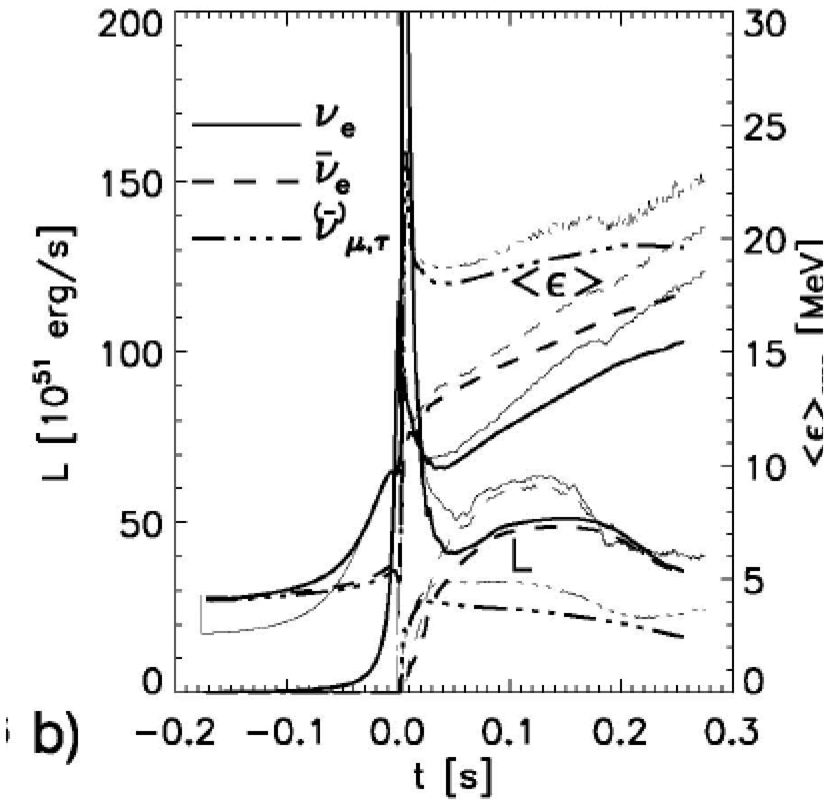
ニュートリノのエネルギーと
モーメンタムの方向の自由度

計算コストが非常に高い。どう解くか？角度積分して自由度を落とす。

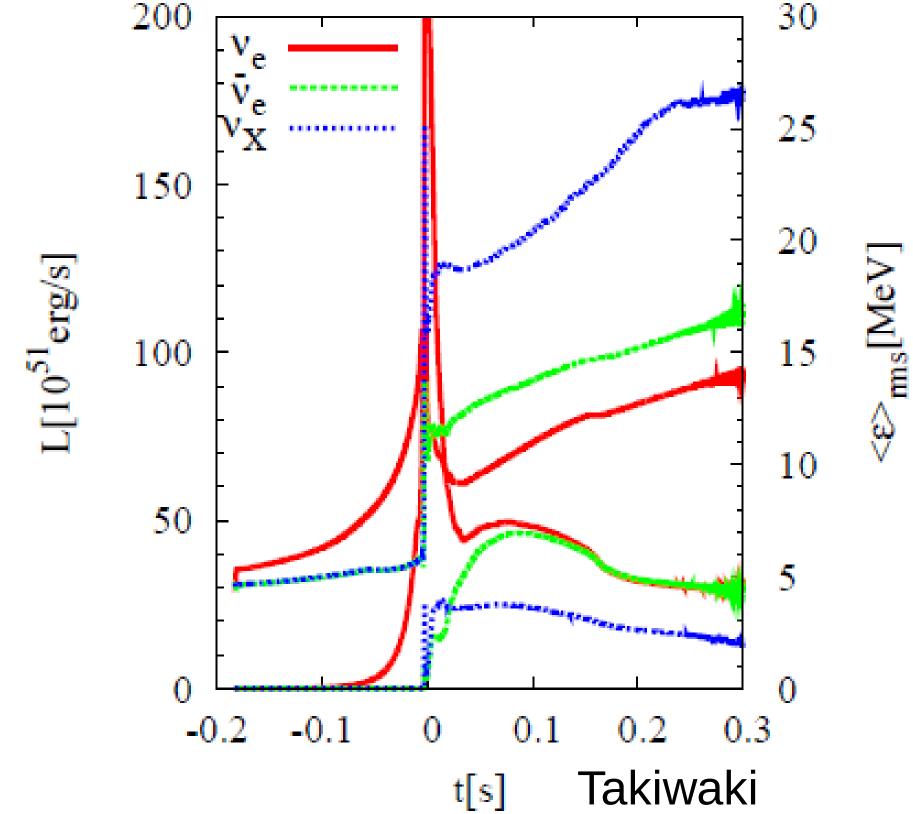
$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = \left(\frac{\delta E}{\delta t}\right)_\nu$$

F**は**Ray-by-Ray**で方向を決め、ニュートリノスフィアの半径の関数でとして外で高速になるように決める。**

Methodの比較



Liebendoerfer et al 2005



Takiwaki

SnとVEの比較。

ただし考慮した反応や流体ソルバーはまちまち

IDSAでの計算。Nu_Xはpairのみ考慮

他の手法とほぼ等しい光度、エネルギー。

しかし若干の差も。

計算のボトルネック

レジスタ(小さくアクセス速い)

L1, L2, L3キャッシュ

メモリ（大きくアクセス遅い）

エネルギーごとのニュートリノ反応率（放出率、吸収率）の計算

$$\kappa(\epsilon) = \mathcal{G}\eta_{\mathrm{np}}(3g_A^2 + g_V^2)[1 - F_e(\epsilon + \Delta)](\epsilon + \Delta)\sqrt{(\epsilon + \Delta)^2 - m_e^2 c^4}$$

$$F_e(\omega) = \frac{1}{\exp(\omega)+1}$$

空間3次元＋エネルギー1次元、ニュートリノの種類で4重ループ

ε: エネルギー。エネルギーのループをベクトル化

ループを展開してメモリのデータ転送の時間を隠したいが、
展開しすぎると、expの命令のデータがL1キャッシュに載らなくなり、
大きくループを展開することができない。
実行効率は10%程度になる。

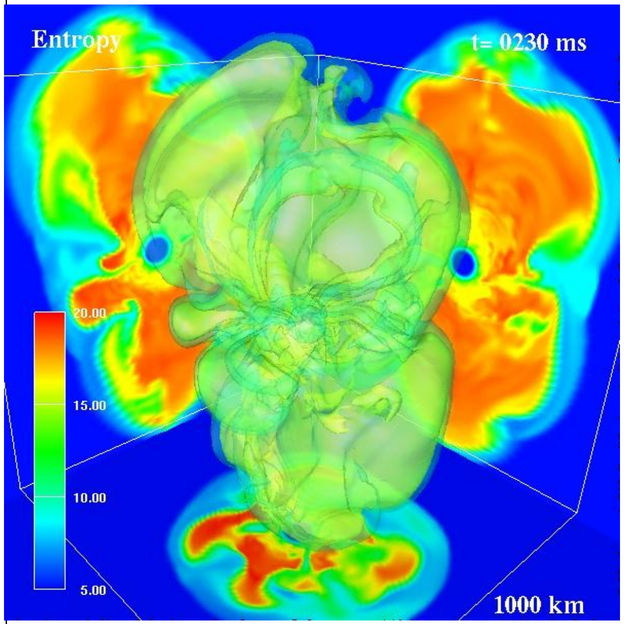
発見１：

自然な対流が起こる３次元計算で爆破するモデルを構築できた

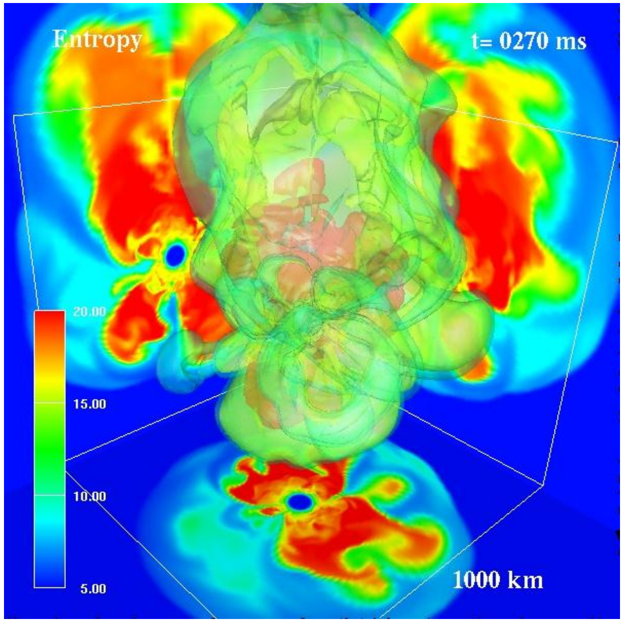
(ただし爆発は弱くEexp= ~6e49 erg、典型的な超新星のエネルギー1e51 ergは説明できない）

⇒ Movieへ

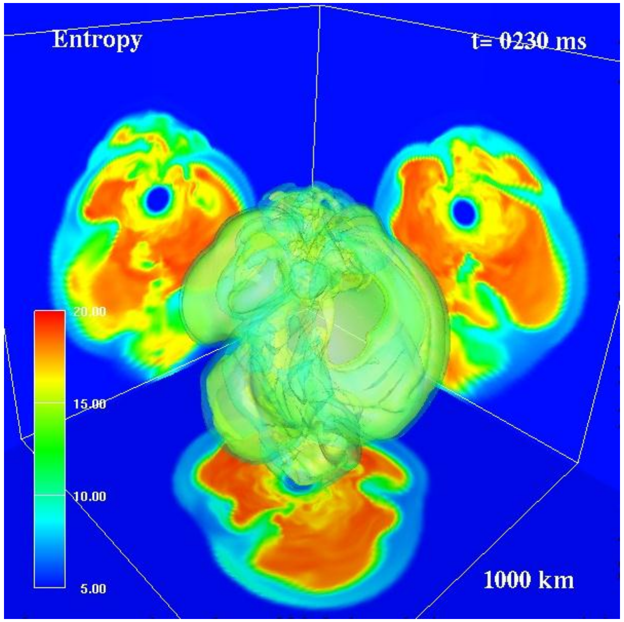
発見２：ストキャスティック



バイポーラーの爆発



北極に強い爆発



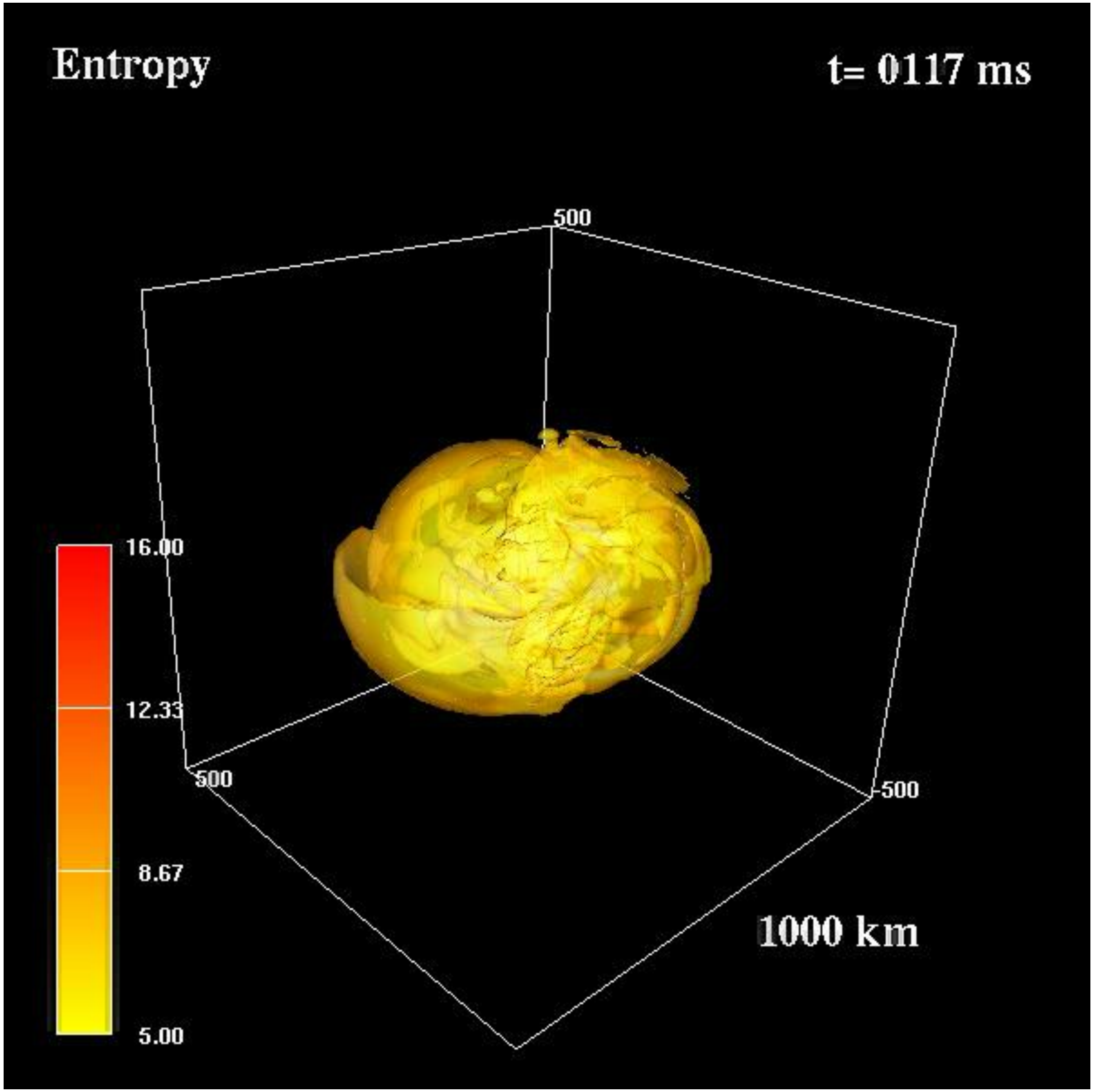
南極に強い爆発

初期の摂動を変えただけで大きく結果が違う。

現在世界中で3次元計算がされ始めているが、グループ間で結果が違う。この原因かもしれない。

複数モデルの平均的な発展を調べる必要あり

発見３：回転は爆発を助ける



Eexp=5e50erg

観測を説明するのに典型的な1e51ergに近づきつつある

まとめ

ニュートリノ輻射輸送をエネルギーごと解く超新星爆発シミュレーションを空間3次元で行った。

発見1：

質量の低い親星であるが、無回転で弱い爆発をさせることができた。

発見2：

そうした高計算コストの計算で3モデルの3Dの計算をし、初期摂動によって衝撃波の形状に大きな違いがあることがわかった。

発見3：

回転は爆発を助け、観測を説明できそうな値まで爆発エネルギーが上がっている。