

超新星爆発の数値シミュレーション の現状と将来の課題

SN1987A

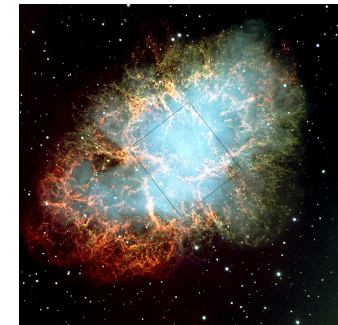


A.K.Mann "Shadow of a Star"

住吉光介

国立沼津工業高等専門学校・教養科物理学教室

Crab nebula (SN1054)



<http://hubblesite.org>

- 超新星: 重い星の最期に起こる爆発
- ニュートリノ輻射流体の大規模計算

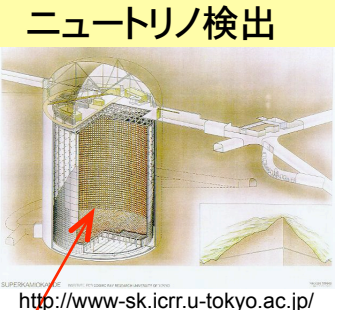
原子核・素粒子・宇宙・計算の複合領域
→ 元素の起源、銀河・宇宙の進化

重力崩壊型超新星爆発

太陽の20倍程度の大質量星の最期におこる大爆発

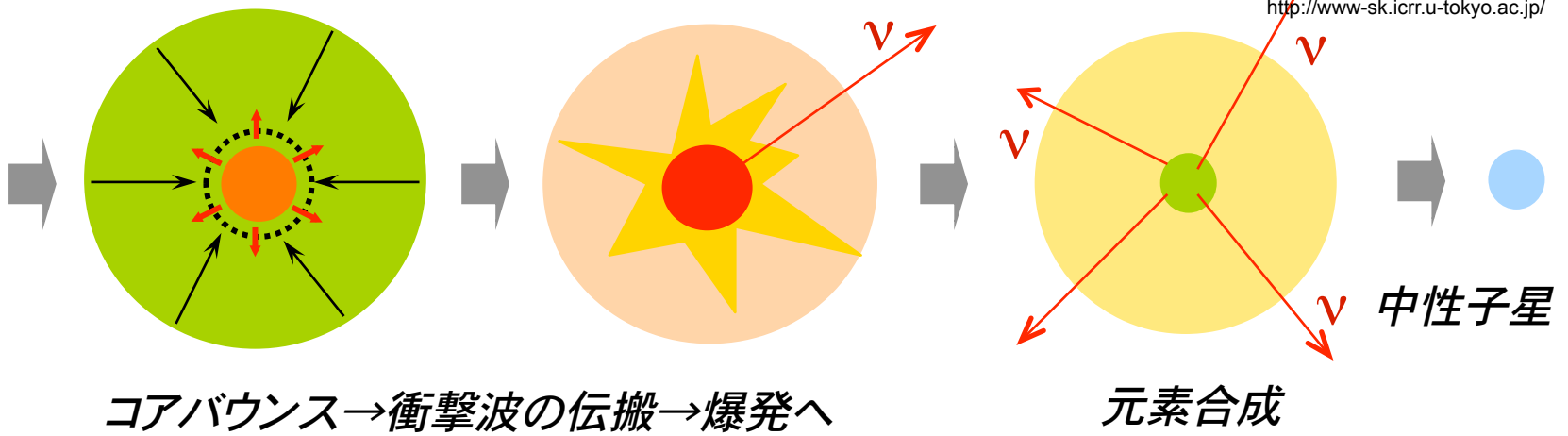
- 重元素の起源:ウラン, 金, プラチナ, レアメタル,..
- 中性子星(パルサー)・ブラックホールの誕生
- 銀河の進化、宇宙線・重力波の源
- 超新星ニュートリノにより内部を探る

1987年2月の観測→2002年ノーベル物理学賞



重力崩壊

超新星ニュートリノ



超新星爆発のエネルギースケール

- 爆発エネルギー: $E_{\text{exp}} \sim 10^{51} \text{ erg}$
- ν 放出エネルギー: $E_{\nu} \sim 10^{53} \text{ erg}$

鉄のコアから
中性子星へ



$$M \sim 1.4 M_{\text{sun}}$$

$$R \sim 10^3 \text{ km} \rightarrow \sim 10 \text{ km}$$

- 中心密度: $\sim 10^{15} \text{ g/cm}^3$ → ニュートリノも逃げられない
- 中心温度: $\sim 10^{11} \text{ K} \sim 10 \text{ MeV}$

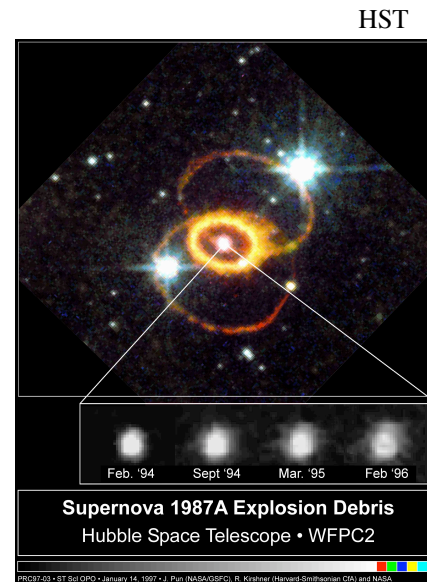
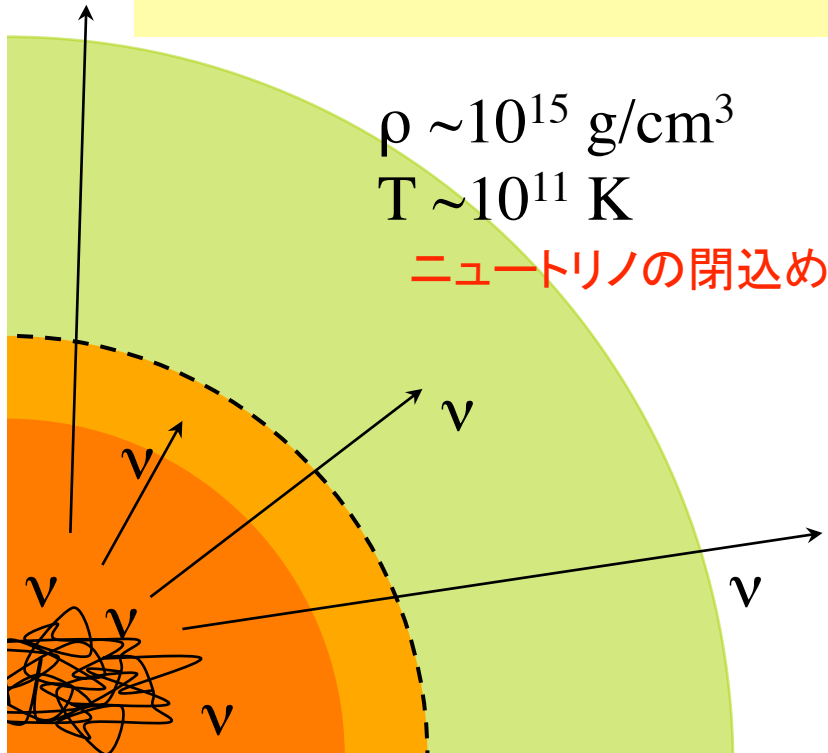
• 解放される重力エネルギー

$$\Delta E_{\text{Grav}} = - \left(\frac{GM^2}{R_{\text{Fe}}} - \frac{GM^2}{R_{\text{NS}}} \right) \sim 10^{53} \text{ erg}$$

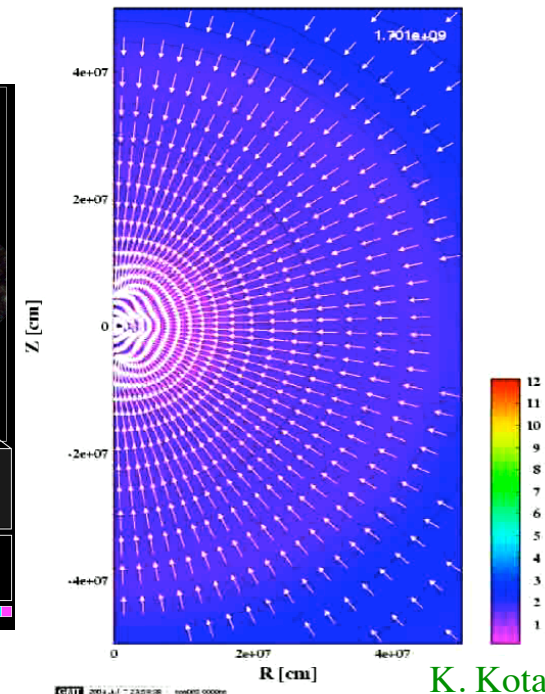
- 約1%が爆発に使われる: 殆どニュートリノが持ち去る
- 精密科学: ニュートリノと物質の相互作用が本質的

超新星爆発メカニズム解明の鍵

- 流体力学
- ニュートリノ輻射輸送
非球対称、対流、回転、非等方ニュートリノ放射、
- 原子核/QCD物理
- ニュートリノ物理
状態方程式、ニュートリノ・原子核反応、
- 多次元における取り扱い
- 数値計算のチャレンジ
- 高温高密度での物質科学
- 理論物理のチャレンジ



多次元

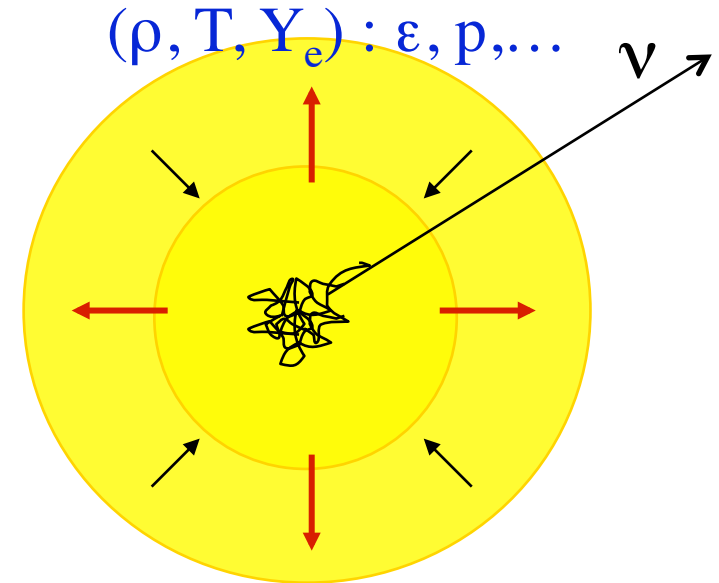


極限状態での物質の性質

原子核内部密度よりも高く、中性子過剰

状態方程式(EOS; Equation of State)

- 星の構造・ダイナミクス
- ニュートリノ反応率



最近の原子核・ハドロン物理の進展 (→ RIBF, J-PARC)

- 中性子過剰不安定原子核データ(半径・質量)
- ハイパー核データ →相互作用

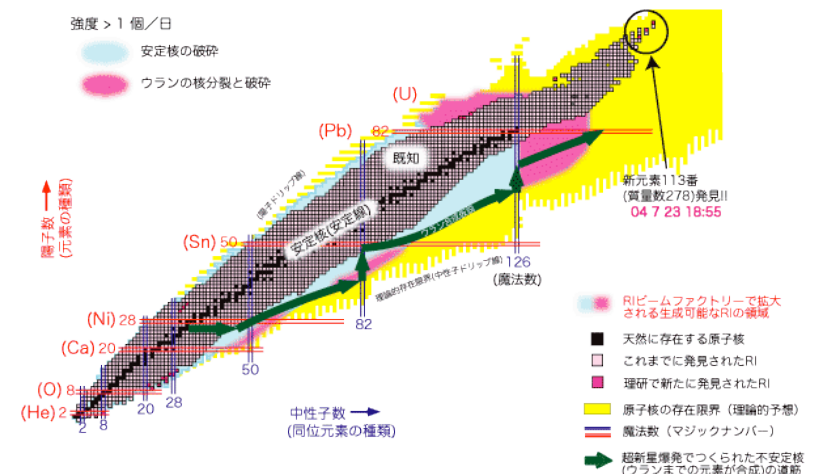
超新星EOSデータテーブル

- 密度: $10^5 \sim 10^{15} \text{ g/cm}^3$
- 温度: $0 \sim 100 \text{ MeV}$
- 陽子の割合: $0 \sim 0.6$

Shen, Toki, Oyamatsu & Sumiyoshi, (1998) NPA, PTP

Ishizuka, Ohnishi, Tsubakihara, Sumiyoshi & Yamada (2008) JPG

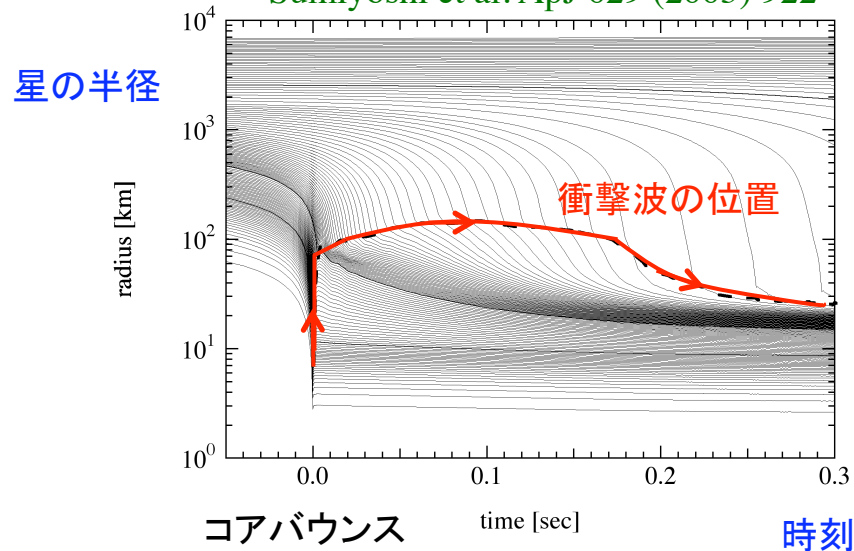
<http://www.rarf.riken.go.jp>



爆発メカニズムは未解決の問題

球対称: 一般相対論的 ν 輻射流体計算 (第一原理計算)

Sumiyoshi et al. ApJ 629 (2005) 922

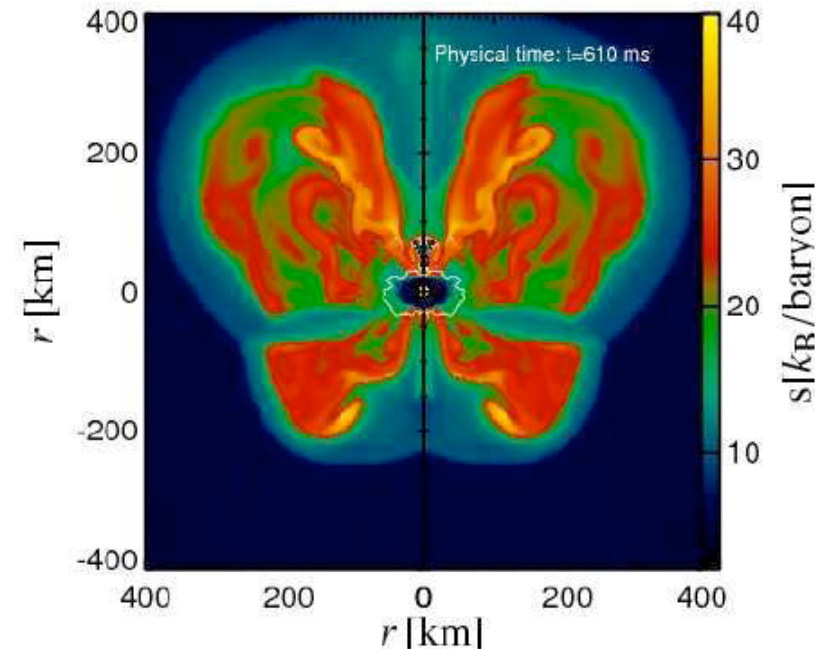


- ニュートリノ輸送を厳密に解く
- 爆発に至らず、衝撃波は後退
- ニュートリノ・原子核物理の検証

多次元: 近似 ν 輻射+流体計算

- 現実的な計算は数例のみ
- 異なる手法・異なるメカニズム
- 系統的な厳密計算が必要

Marek-Janka, astro-ph/0708.3372

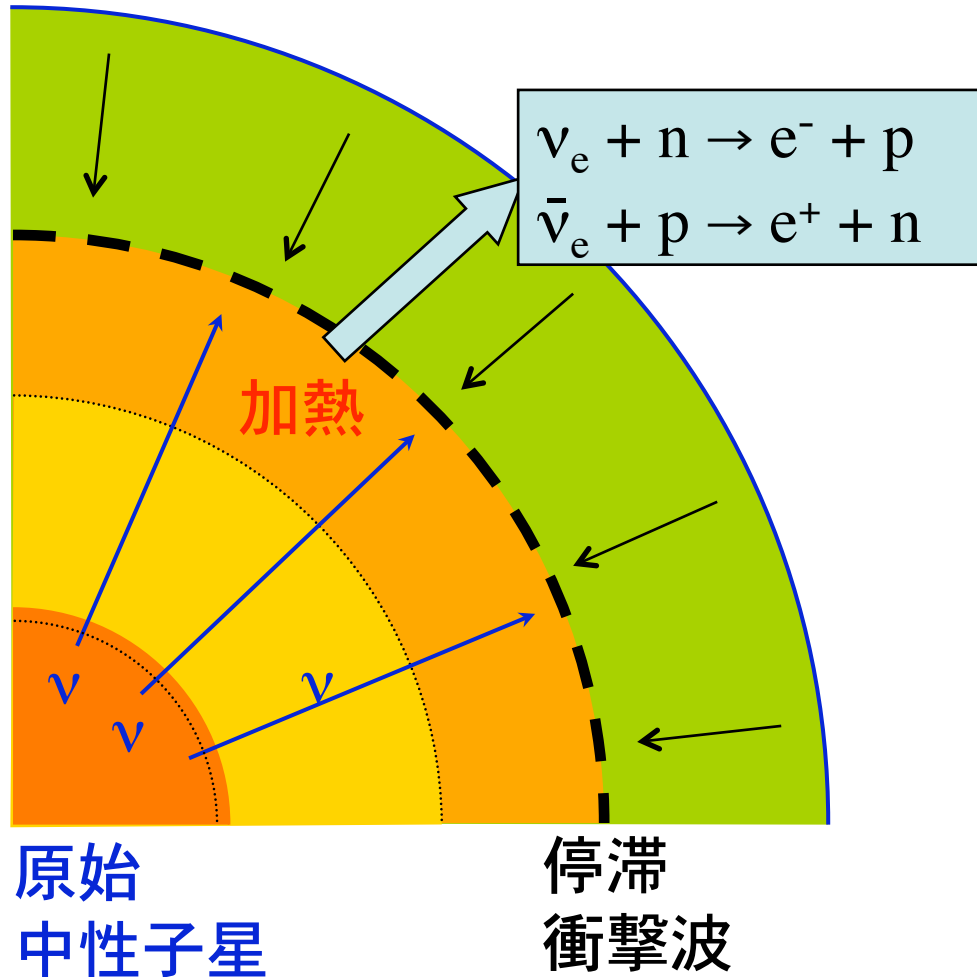


爆発を決める要因の例: ニュートリノ加熱

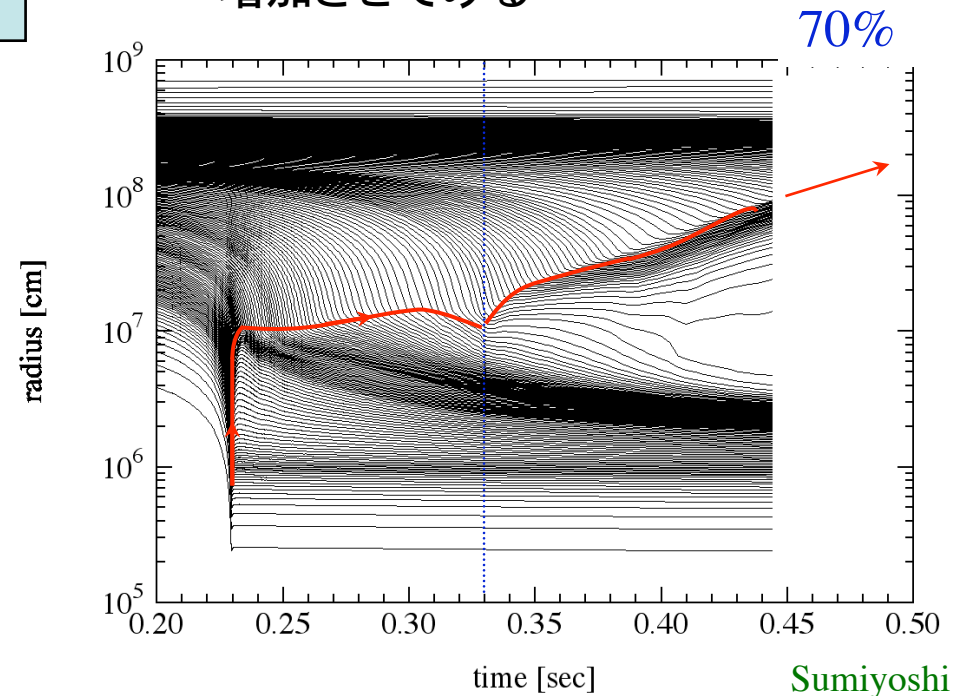
• ニュートリノ加熱が十分ならば爆発

- ν 吸収反応によるエネルギー移行
- ニュートリノ反応率/輻射輸送

$$E_{\nu\text{-heat}} \sim 2.2 \times 10^{51} \left(\frac{\Delta M}{0.1 M_{\text{solar}}} \right) \left(\frac{\Delta t}{0.1 \text{s}} \right) \text{erg}$$



- ν 加熱の依存性の例
核子吸収による加熱を30, 50, 70%
増加させてみる



(from $t_{\text{pb}}=100$ msec)

Sumiyoshi

ν輻射輸送計算が極めて重要であり難しい

- 星内部からνが出てくるまで(ν輻射輸送方程式)
 - νの空間・運動量・方向分布を追う $f(t, x, y, z, p_x, p_y, p_z)$: 6+1次元問題

星の表面

密度分布の表面

自由に伝搬
散乱しない

$$\frac{\partial f_\nu}{c \partial t} + \vec{n} \cdot \vec{\nabla} f_\nu = \left(\frac{\partial f_\nu}{c \partial t} \right)_{collision}$$

- νの伝搬を追う
- ν散乱・吸収・放出反応 (電子・陽子・中性子・原子核)を追う: E_ν 依存
- 等方性・フェルミ分布は仮定できない
- 堅い方程式、安定性
→時間発展は陰解法

停滞衝撃波

ν加熱

熱・化学平衡

十分に反応/散乱

拡散

段々散乱しなくなる

非平衡

←高温/高密度

低温/低密度→



主な計算ロード:大規模行列の解法

球対称の例: Sumiyoshi & Ebisuzaki, Parallel Computing 24 (1998) 287

- Block Size: N=347
- Block Array: M=255

• ブロック三重対角行列

• 格子点数:

空間

$$N_r = 255,$$

vエネルギー

$$N_E = 14$$

v角度

$$N_\theta = 6$$

v種類

$$N_v = 4$$

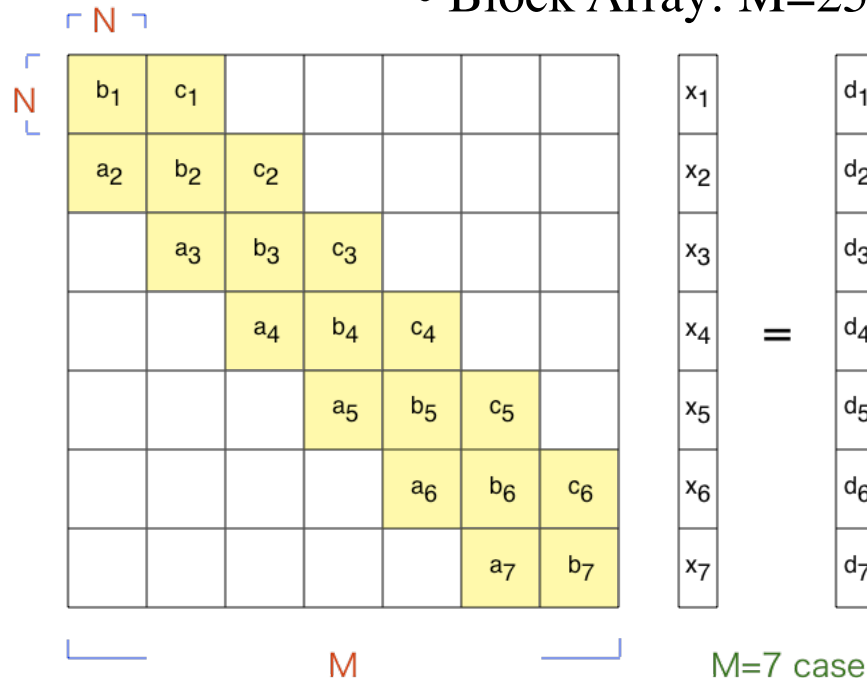
- v-分布: $f_i(t, r, E_v, \mu)$

- $i = v_e, \bar{v}_e, v_\mu, \bar{v}_\mu, (v_\tau, \bar{v}_\tau)$

• 演算数

$$\sim N_r * (N_E * N_\theta * N_v)^3 = 255 * (347)^3$$

~ 10G operations



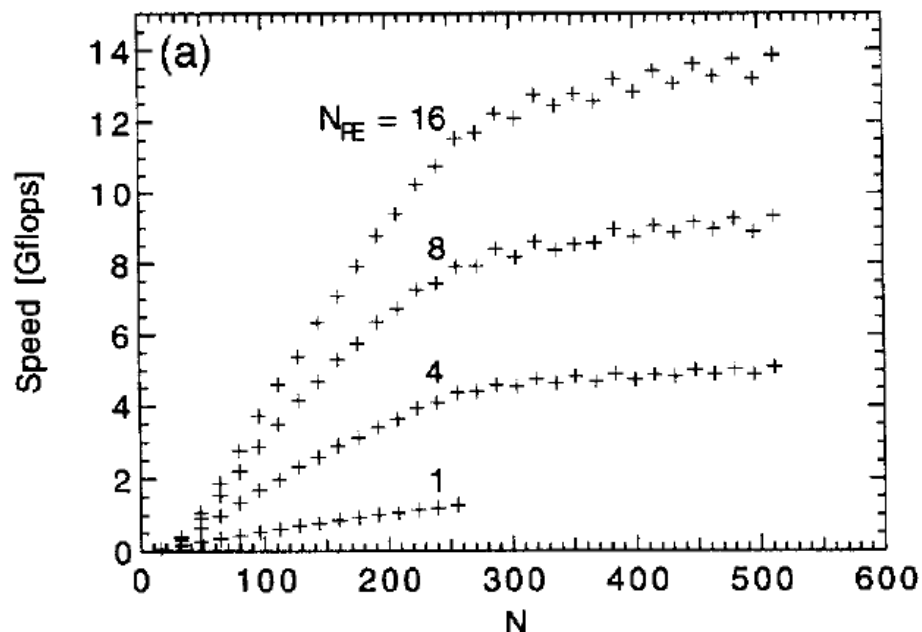
多次元では、ブロック五(七)重対角

- Block Size: N~1000
- Block Array: M~100ⁿ
- ~ 1P operations

チューニング技術:ベクトル並列化

Sumiyoshi & Ebisuzaki, Parallel Computing 24 (1998) 287

アルゴリズム: 並列巡回縮約法



- Nが大きい:ベクトル性能が高い
- $M \gg N_{PE}$ の時:並列効率が良い

「昔の」性能測定例

理研VPP500/28 (1.6Gflops, 1PE)

$M=63, N_{PE}=1,4,8,16$

この時のチューニングが後で役立った

最近の例:

国立天文台 VPP5000/60 (9.6Gflops,1PE): $N=347, M=255$

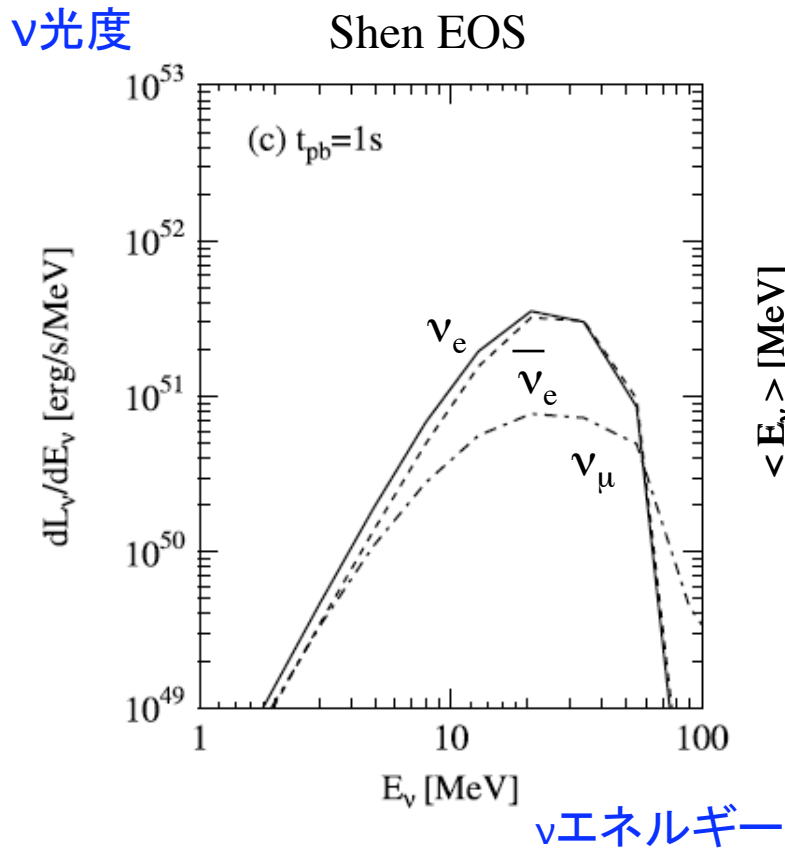
超新星爆発の計算:時間発展~1秒(球対称)

→ ~1000時間@8PE (Time step $\sim 10^{-5}$ sec: $\sim 10^5$ step)

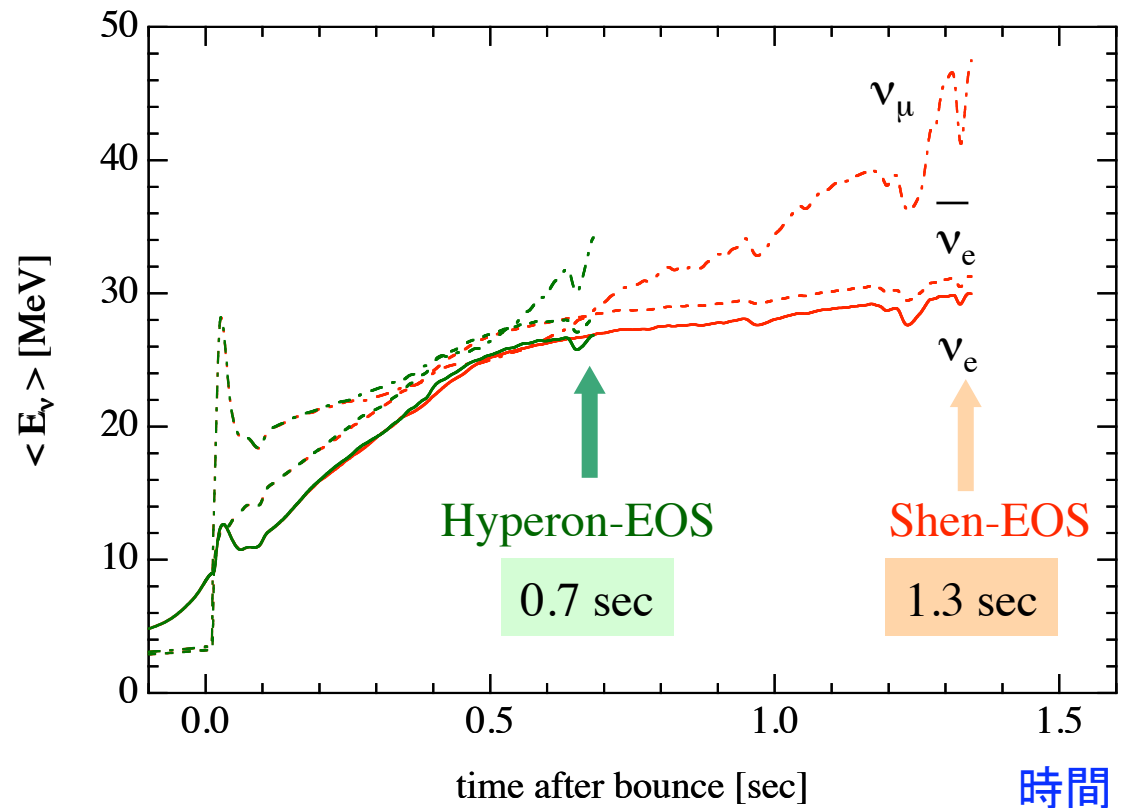
超新星ニュートリノ予測：内部を探る

例：ブラックホール形成を検出できる (1~4x10⁴個のνを検出)

νエネルギースペクトル



ν平均エネルギー時間発展



高温高密度でハイペロン粒子の出現

Sumiyoshi et al., PRL (2006)

Sumiyoshi, Yamada & Suzuki ApJ (2007)

Sumiyoshi et al. ApJ (2008) submitted

超新星爆発メカニズム解明へ向けて

- 数値シミュレーションでは爆発を再現できていない

- 球対称では第一原理計算→マイクロ物理の緻密な検証
- 最終的な答えには多次元輻射流体計算が必要

- ニュートリノ・原子核物理

- 高温高密度での物質科学

→物理・天文・計算科学
の連携が必要

- ニュートリノ輻射流体力学

- 6次元の時間発展問題

- 数値計算技術

- 大規模行列の計算アルゴリズム

→星・銀河・宇宙の進化
元素の起源の解明へ

This presentation is based on the collaboration with S. Yamada, H. Suzuki and many others.
The numerical simulations have been performed on NAOJ, JAEA/Tokai, YITP and RCNP.