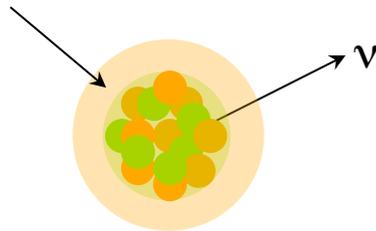
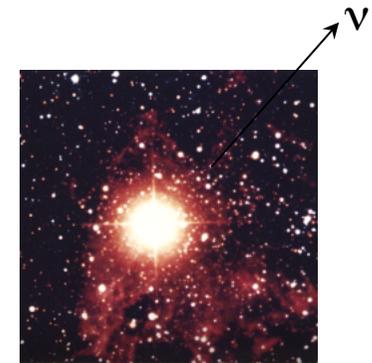


# 超新星シミュレーションの状態方程式：現状と影響



住吉光介

沼津工業高等専門学校  
教養科物理学教室



SN1987A

- 状態方程式データテーブルの構築
- 超新星の数値シミュレーション
- 爆発メカニズムを探る、超新星ニュートリノ予測

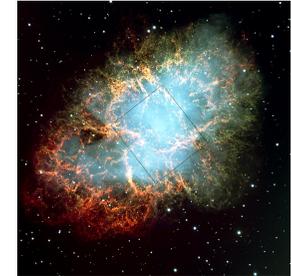
Supernova EOS  $\rightarrow$  Dynamics

# 重力崩壊型超新星の興味(中性子星の観点から)

## - 中性子星・ブラックホールの誕生

- どのように誕生するのか? (質量・構造)
- エキゾチックな物質は? (いつ・どこ)

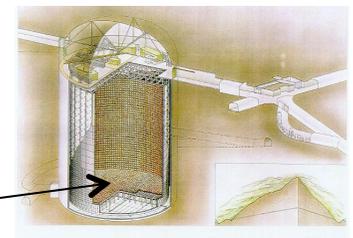
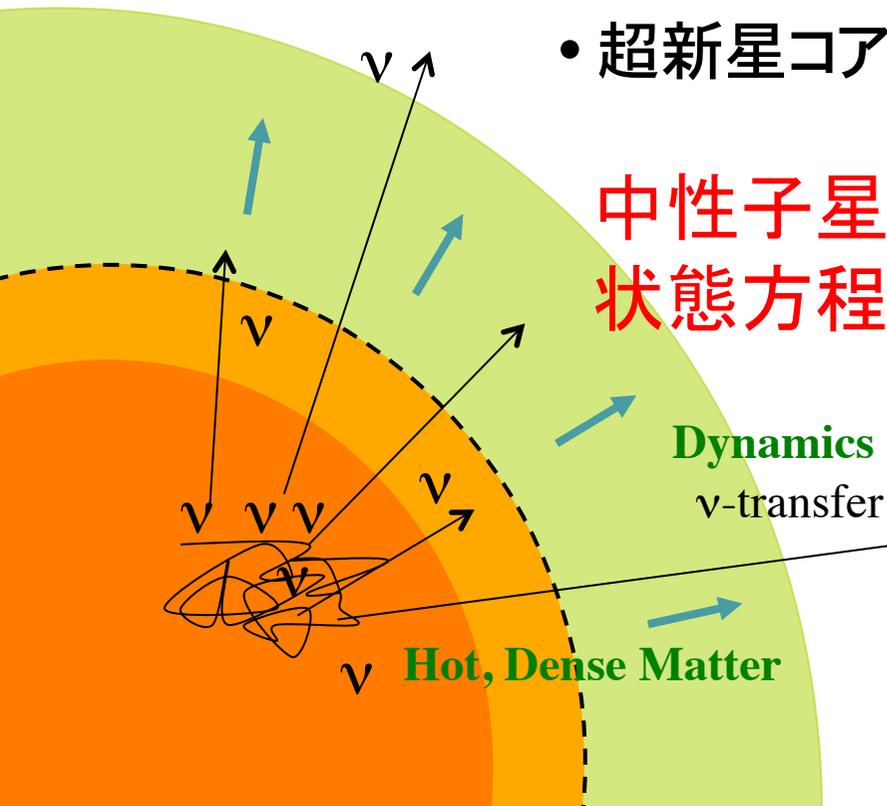
かに星雲 (SN1054)



## - 高温・高密度での状態方程式

- ダイナミクスへの影響は? → 爆発メカニズム
- 超新星コアでのニュートリノ? → 内部を探る方法

中性子星・超新星爆発を  
状態方程式の観点から解明したい



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

Supernova  $\nu$   
Probe inside

Super-Kamiokande

# 超新星における状態方程式

cf. 中性子星  
ゼロ温度  
ベータ平衡

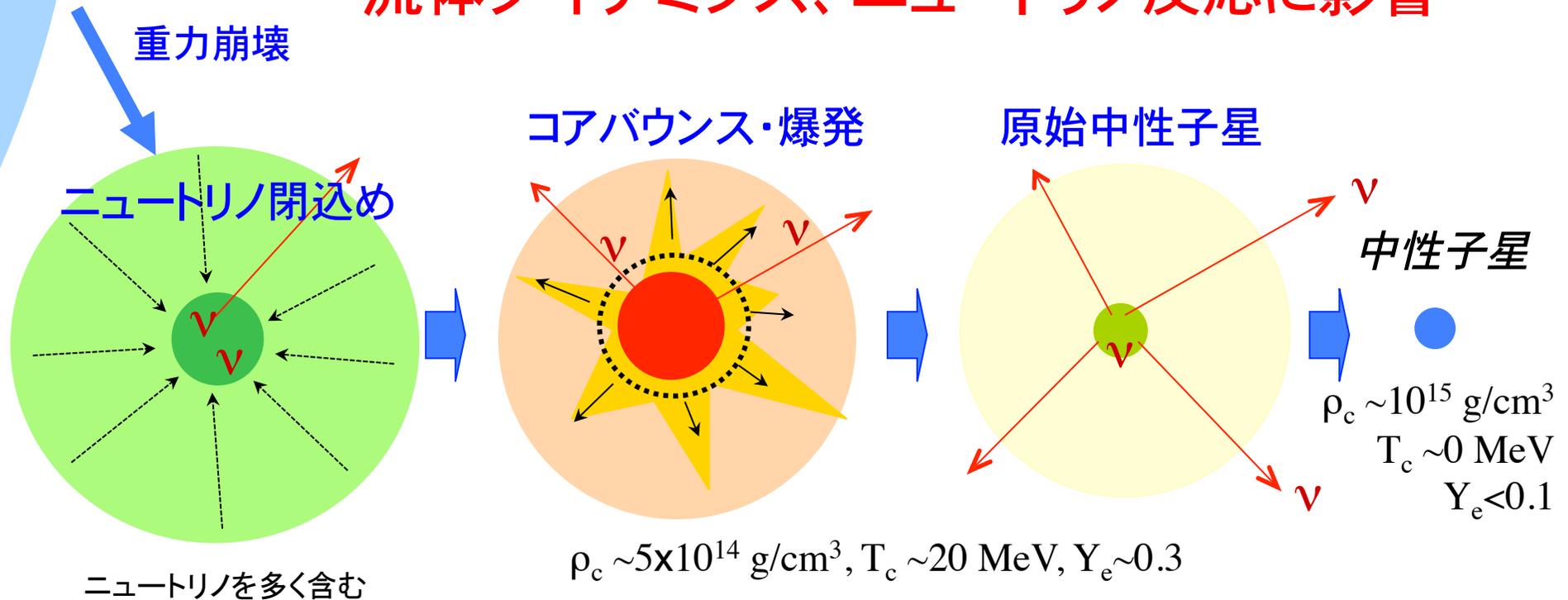
大質量星  
 $> 10M_{\text{sun}}$

鉄コア

$\rho_c \sim 10^{10} \text{ g/cm}^3$   
 $T_c \sim 1 \text{ MeV}$   
 $Y_e \sim 0.46$

- 高い温度まで達する
- 密度の範囲が広い
- 対称核物質から中性子過剰まで

- 流体ダイナミクス、ニュートリノ反応に影響



# 超新星シミュレーション用の状態方程式 ( $\rho$ , $T$ , $Y_e$ )

- 一貫した枠組み(核子多体理論)で全領域をカバー
- 出来る限り実験・観測によりチェックする
  - エネルギー, 圧力, 組成, 化学ポテンシャル など諸量
  - 陽子, 中性子, 原子核の混合, 非一様分布

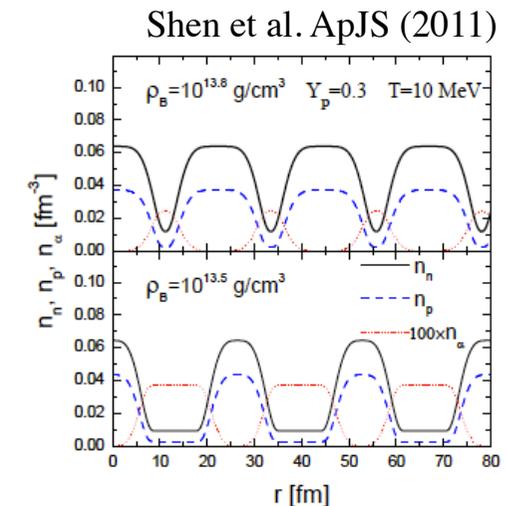
- 広く用いられているEOS Table

- Lattimer-Swesty EOS (1991)

- Extension of liquid drop models
    - 飽和点で関数のパラメータを決めた

- Shen, Toki, Oyamatsu & Sumiyoshi EOS (1998, 2011)

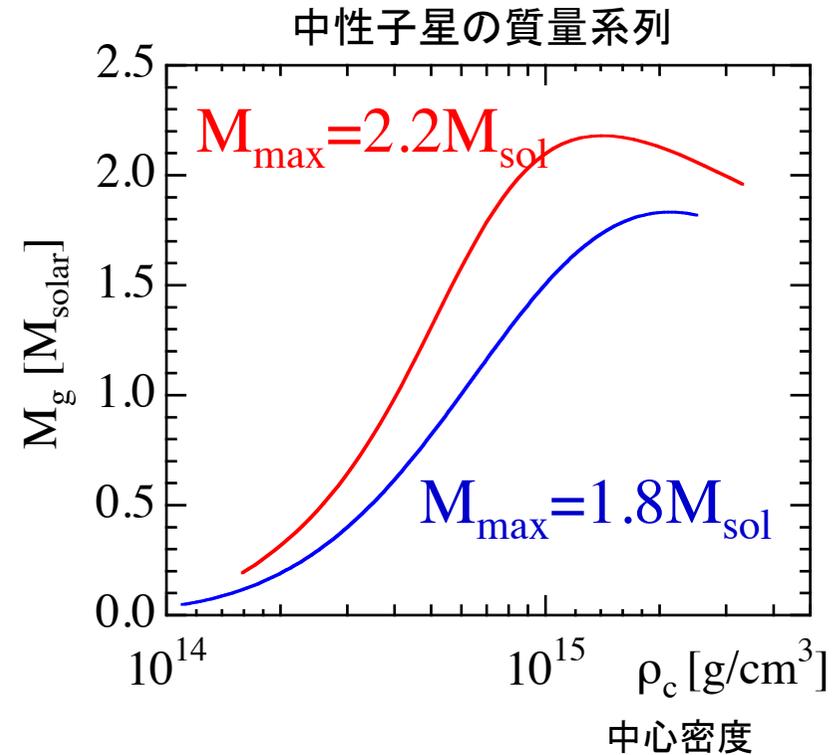
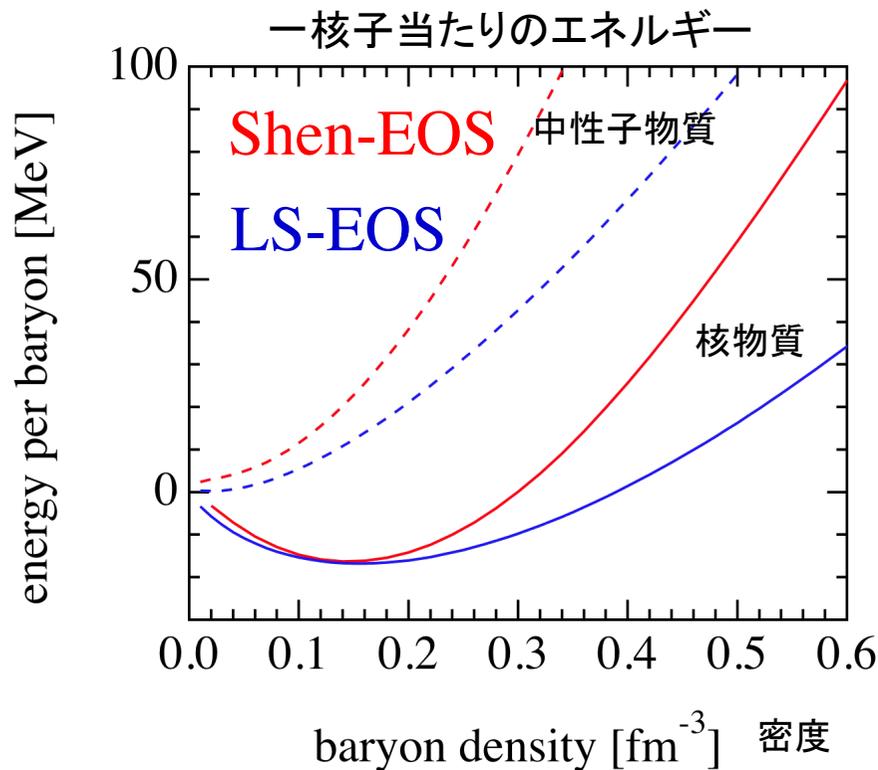
- Relativistic Mean Field Theory + Thomas-Fermi
    - 不安定核の質量・半径データにより核子間相互作用を決めた



## 2つの超新星EOSの比較: Shen-EOS vs LS-EOS

- 堅さ: 最大質量、バウンス
- 対称エネルギー: 組成、 $\nu$ 反応  
超新星への影響は?

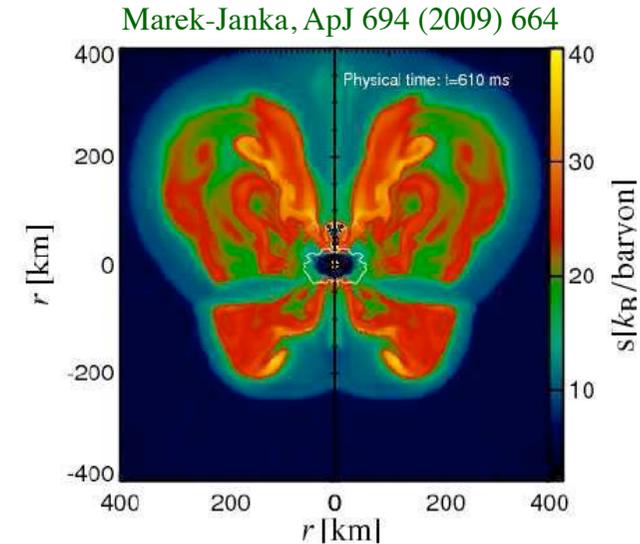
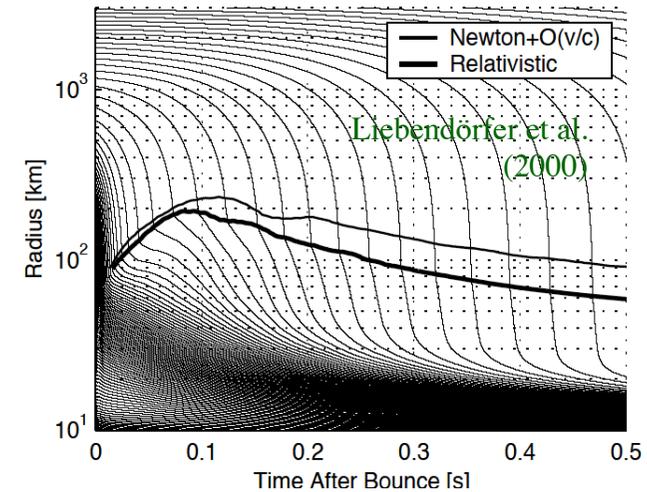
	$A_{\text{sym}}$ [MeV]	$K$ [MeV]
LS	29.3	180
Shen	36.9	281



# 超新星爆発メカニズムは未解決の問題

- 1D(球対称): 爆発しない
  - $\nu$ 輻射流体計算 (4 groups)
  - ミクロ物理の検証
- 2D: 爆発の数例(弱い)
  - バウンス後、遅れて爆発する
  - 互いに異なるメカニズム
- 3D: 流体不安定性の探索

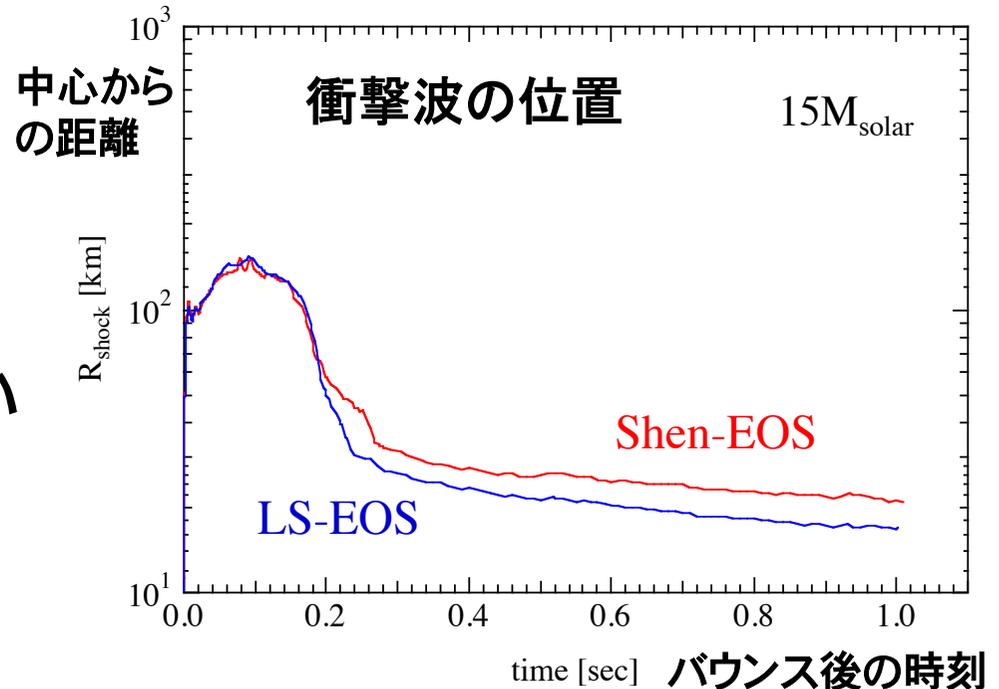
3D  $\nu$ 輻射輸送計算が課題  
状態方程式+ $\nu$ 反応率



# 超新星爆発における状態方程式の影響(1D)

Sumiyoshi et al. ApJ (2005)

- 堅さと組成の違い
  - 複数効果が相殺
- バウンス時
  - まだ密度が高くない
- 原始中性子星誕生
  - 後半でEOSの違い



- 2D, 3D超新星計算でも、調べる必要がある
  - 柔らかい方が有利?

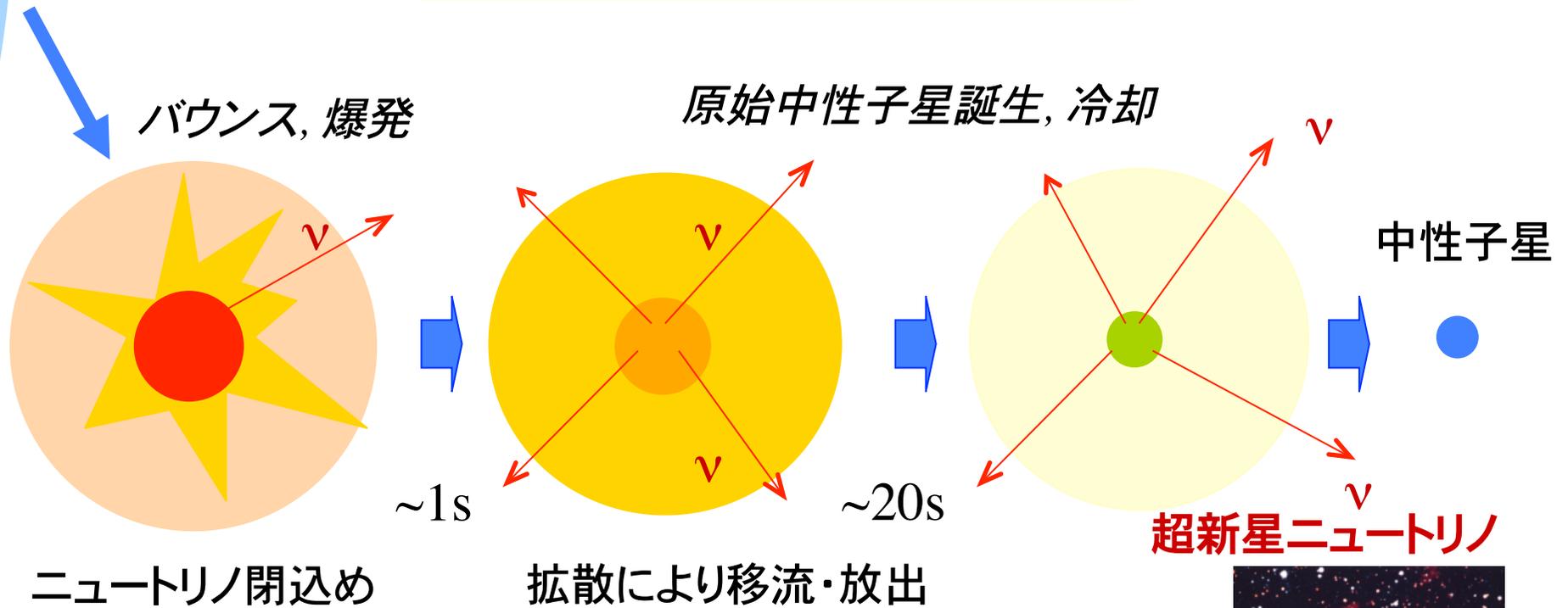
# EOSを探る: 超新星爆発からのニュートリノ放出

Burrows, Suzuki

- 重力崩壊・バウンスの後
- 中心に原始中性子星が誕生
- ニュートリノ放出で冷却

親星鉄コア

10-20M<sub>sun</sub>



- 約20秒の間、ニュートリノ放出
- 高温高密度物質の性質を探る

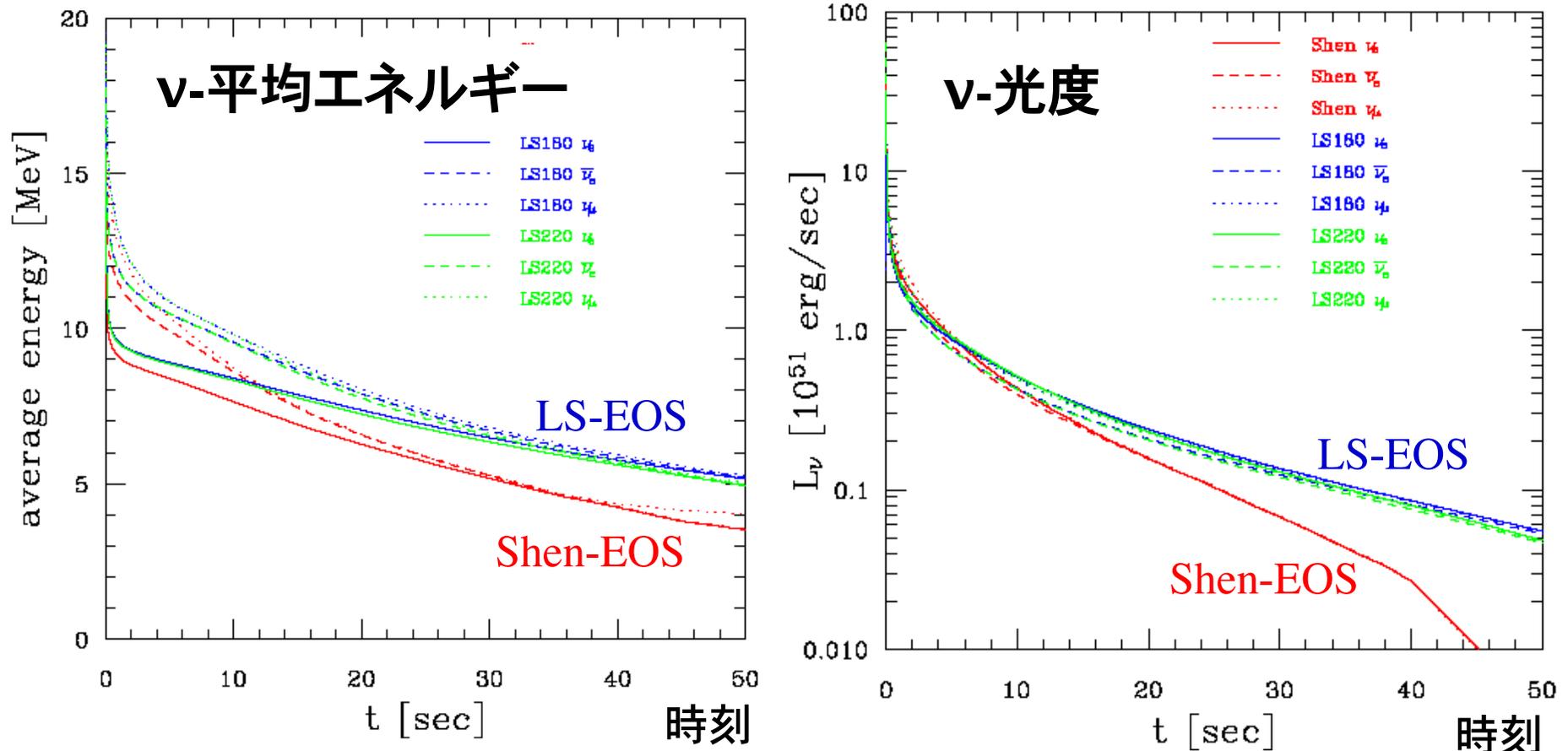


SN1987A

# 原始中性子星冷却による超新星ニュートリノ

Burrows, Pons, H. Suzuki

$\nu$ -放出  $\sim 20$ sec 平均エネルギー・光度減衰



柔らかいEOS  $\rightarrow$  内部温度が上がる  $\rightarrow$  高いエネルギー

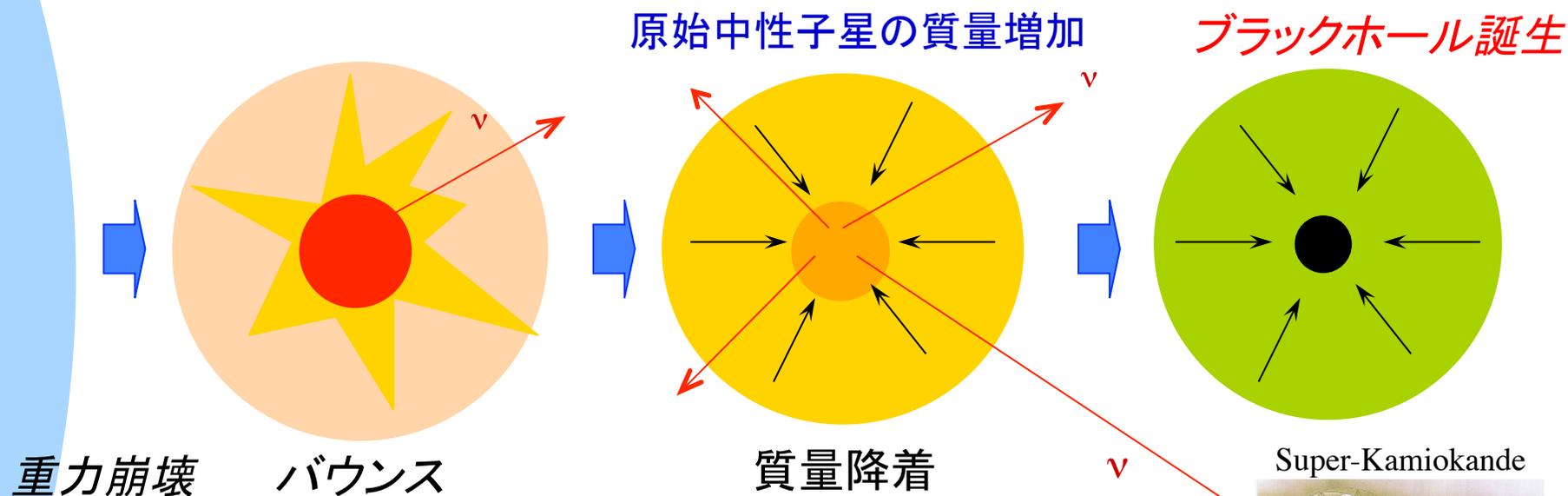
# EOSを探る: より大質量の星( $\sim 40M_{\text{sun}}$ )の場合

Sumiyoshi et al., PRL (2006), Nakazato (2010)

親星鉄コア

$\sim 40M_{\text{sun}}$

- 鉄コアが大きすぎて、爆発しない
- 原始中性子星から約1秒でブラックホールへ
- 短いニュートリノ放出 (cf. 超新星 $\nu$ : 約20秒)



さらに高温高密度状態を探る  
エキゾチックな物質の出現  $\Leftrightarrow$  ニュートリノ観測

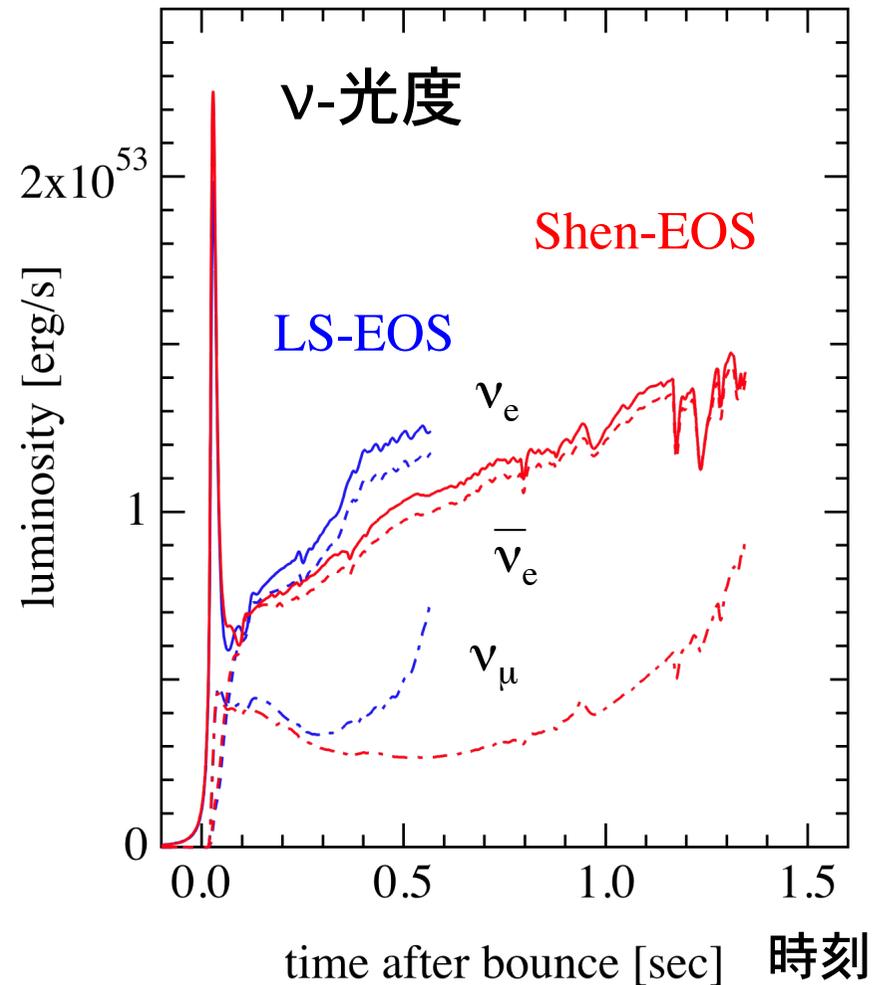
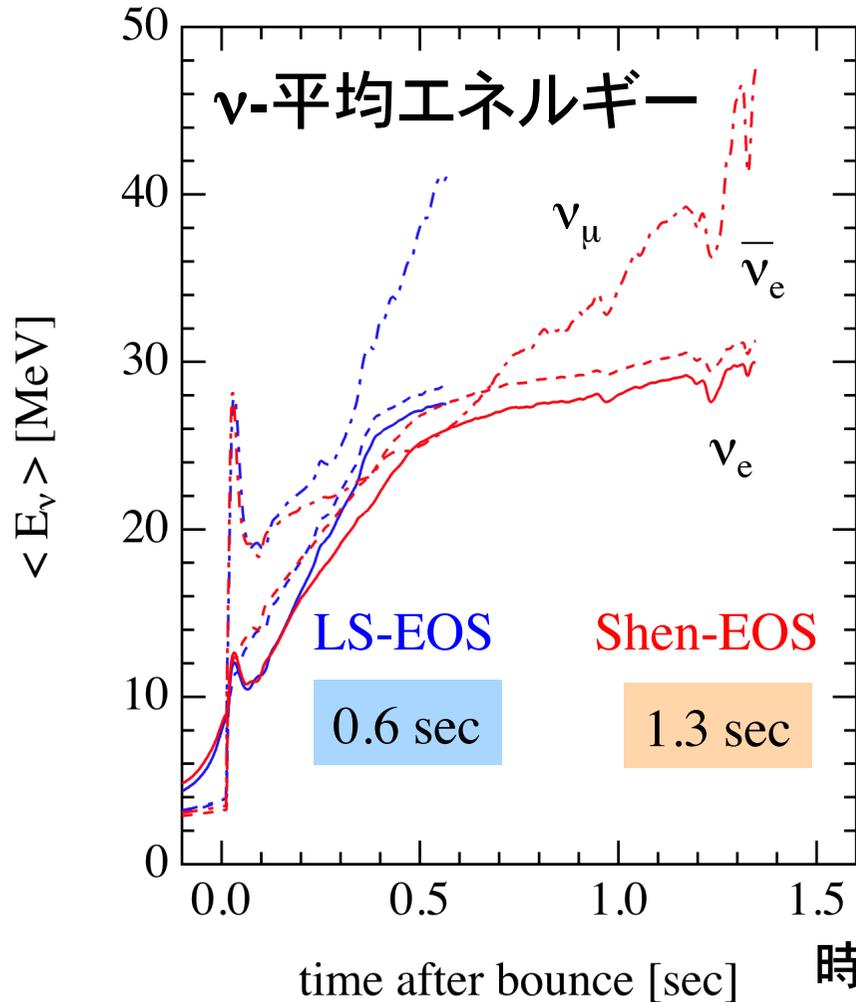


# ブラックホール誕生までのニュートリノ放出

短い時間(~1s)

平均エネルギー・光度急増

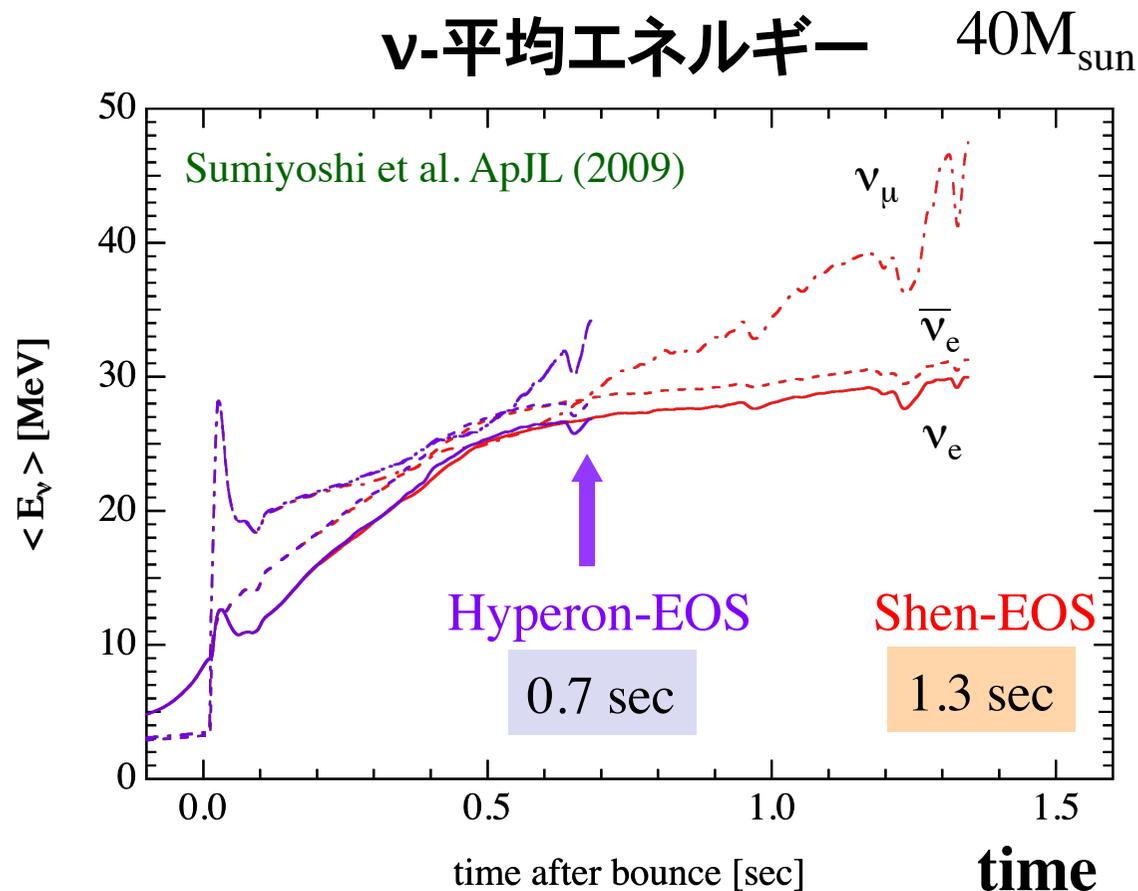
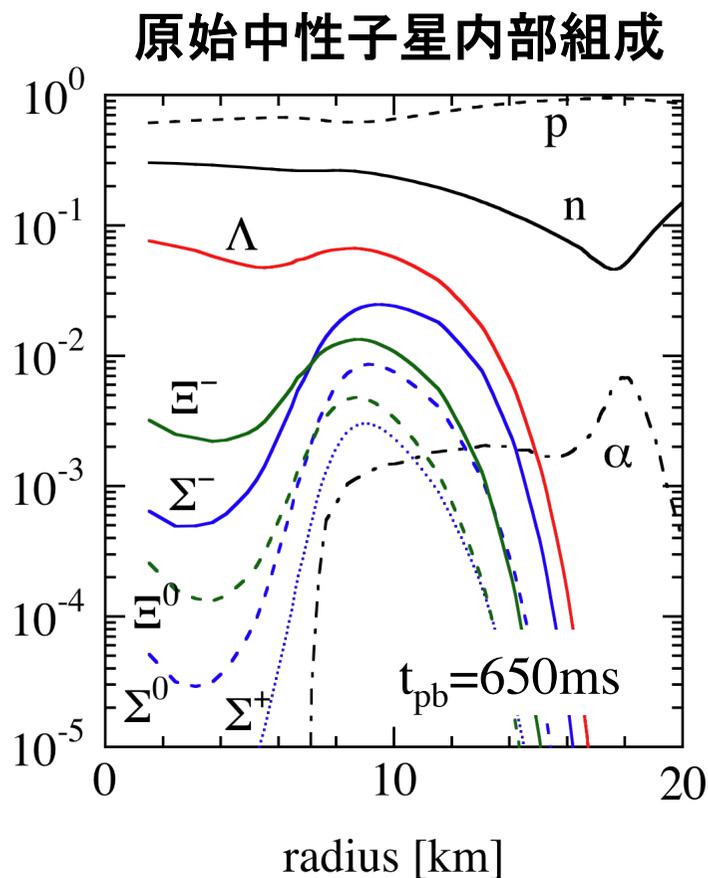
40M<sub>sun</sub>



柔らかいEOS → 早くに崩壊 → 短いニュートリノ放出

# 原始中性子星でハイペロン出現 Ishizuka-Ohnishi, Hyperon EOS table (2008)

## ブラックホールへ再崩壊の引き金となる



- ニュートリノ観測によりハイペロン物質を探る

# Thanks for collaboration with

- Supernova research
  - S. Yamada
  - K. Nakazato
  - H. Suzuki
- Supernova EOS table
  - H. Shen
  - K. Oyamatsu
  - H. Toki
  - A. Ohnishi, C. Ishizuka
  - S. Furusawa
  - G. Röpke
- Neutrino-reactions
  - T. Sato
  - S. X. Nakamura
  - S. Nasu
- Supercomputing
  - S. Hashimoto
  - H. Matsufuru
  - T. Sakurai, A. Imakura
- Numerical simulations
  - K. Kotake, T. Takiwaki
  - H. Nagakura

新学術領域「計算科学による素粒子・原子核・宇宙の融合」  
HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」



*Supercomputing resources at KEK, YITP, UT, RCNP, JAEA, NAOJ*

## まとめ

- 高温高密度物質のEOSは超新星の研究で不可欠
  - コアバウンス, 爆発, 超新星ニュートリノへの影響
- EOS Data Tableの研究・整備が進んでいる
  - Shen EOS vs LS EOS: 堅さ-柔らかさ, 組成
  - ハイペロン, クォーク物質への拡張
- ニュートリノにより状態方程式を探る
  - ブラックホール形成時のニュートリノ放出 (cf. 超新星 $\nu$ )
- EOS table → ダイナミクス → 影響・観測の流れ
  - 最新の中性子星観測・実験データによる精密化へ