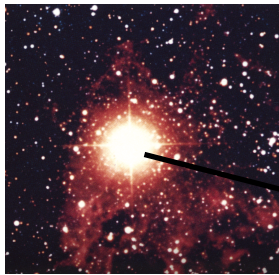


超新星爆発における状態方程式 データテーブルの現状と課題

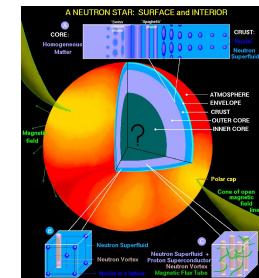
SN1987A



ν

住吉光介(沼津高専)

中性子星



- 中性子星の誕生する所
- 超新星ニュートリノが重要
- 高温高密度物質の影響

重力崩壊型超新星の爆発シナリオ

$\sim 20M_{\text{sun}}$

鉄のコア

重力崩壊

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

電子捕獲
反応

$\sim \text{数}1000 \text{ km}$

コアバウンス

$\rho_c \sim 3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$
 $T_c \sim 5 \text{ MeV}$

高温高密度
核物質

衝撃波

ν -閉込め

$\rho_c \sim 10^{12} \text{ g/cm}^3$
 $T_c \sim 2 \text{ MeV}$

ν 反応

超新星 ν

爆発

$\rho_c \sim 4 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$
 $T_c \sim 10 \text{ MeV}$

原始中
性子星

元素合成

中性
子星

$T \sim 0 \text{ MeV}, Y_e < 0.1$

$\sim 10 \text{ km}$

$E_{\text{exp}} \sim 10^{51} \text{ erg}$

原子核・ハドロン・宇宙・数値物理

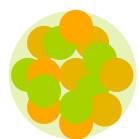
- 状態方程式
- ニュートリノ反応
- 核データ

- 流体力学
- ニュートリノ輸送
- 星の進化モデル

- 重力崩壊型超新星爆発の数値シミュレーション
 - スーパーコンピュータ: 並列計算技術

核物理の観点から:

- 高温高密度物質とニュートリノが果たす役割

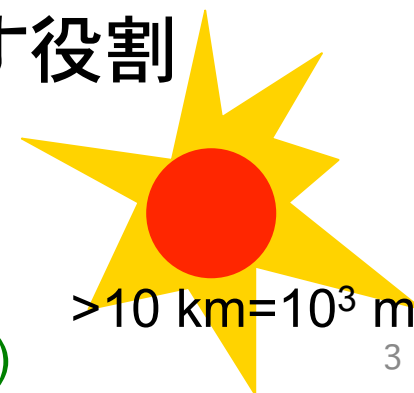


~ fm = 10^{-15} m

新学術領域「計算科学による素核宇融合」

HPCI戦略P分野5「物質と宇宙の起源と構造」課題3

3D ν -transfer: Sumiyoshi Yamada ApJS (2012)



> 10 km = 10^3 m

状態方程式の影響：重力崩壊からバウンスへ

もしも、爆発させたいなら、、、

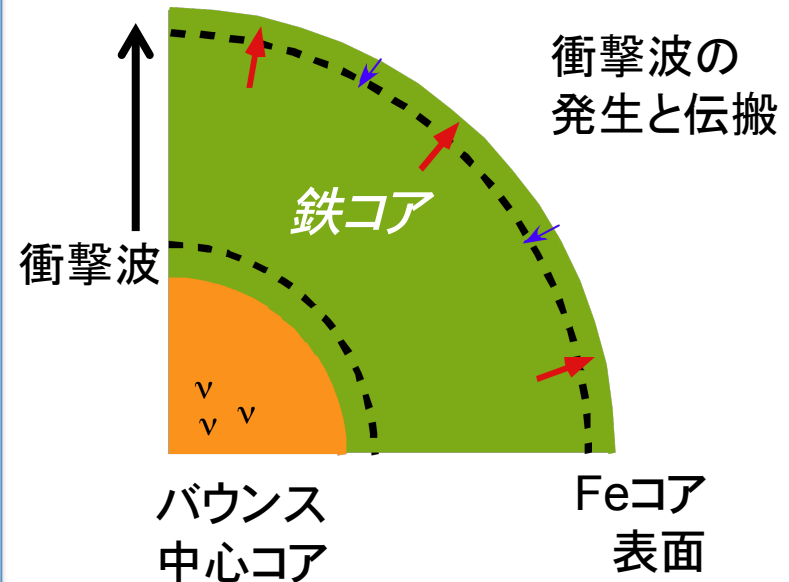
- 状態方程式が柔らかく

ex. 非圧縮率 $K_0 \downarrow$

- 電子捕獲反応が起きない

ex. 自由陽子の存在比 $X_p \downarrow$
($e^- + p \longrightarrow \nu_e + n$)
原子核の捕獲反応率 $\downarrow$

Baron, Takahara, Bruenn (late 80's)



- バウンス時の中心コアで： 質量が大きい, 半径が小さい
ニュートリノが沢山溜まる
→ 重力エネルギーの解放 $\uparrow$, 鉄の分解による損失 $\downarrow$

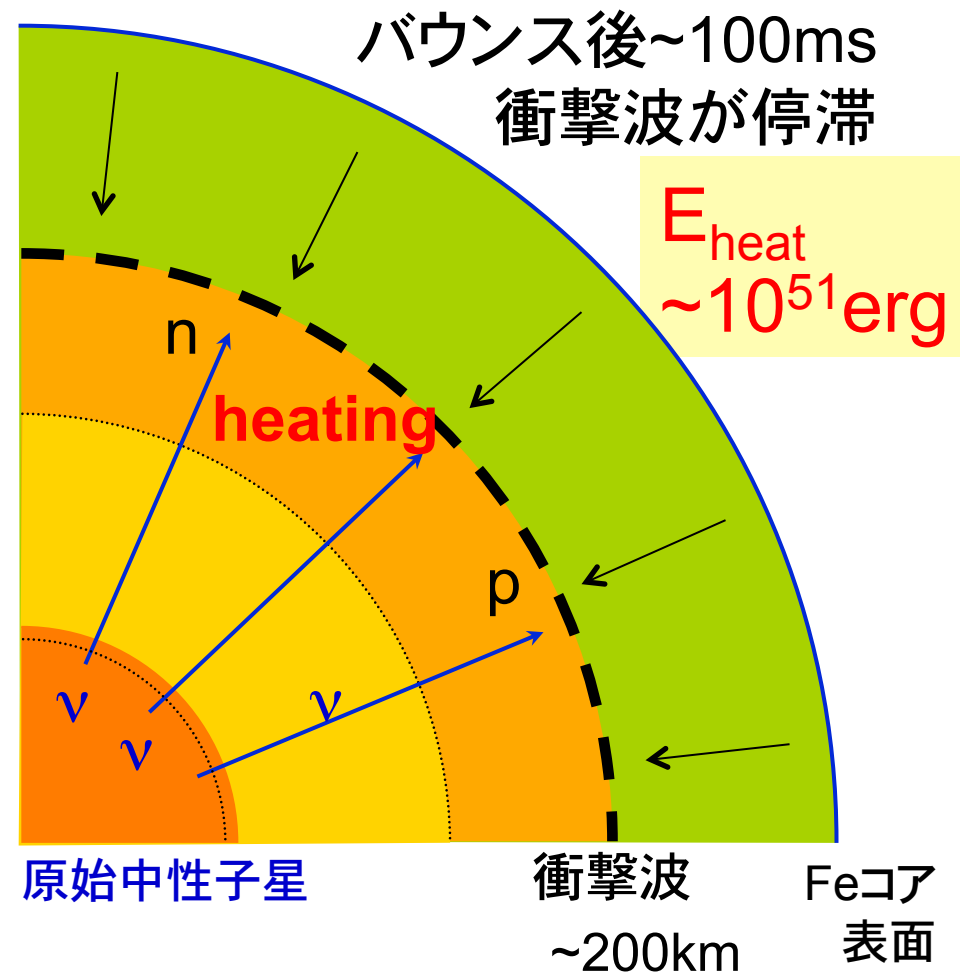
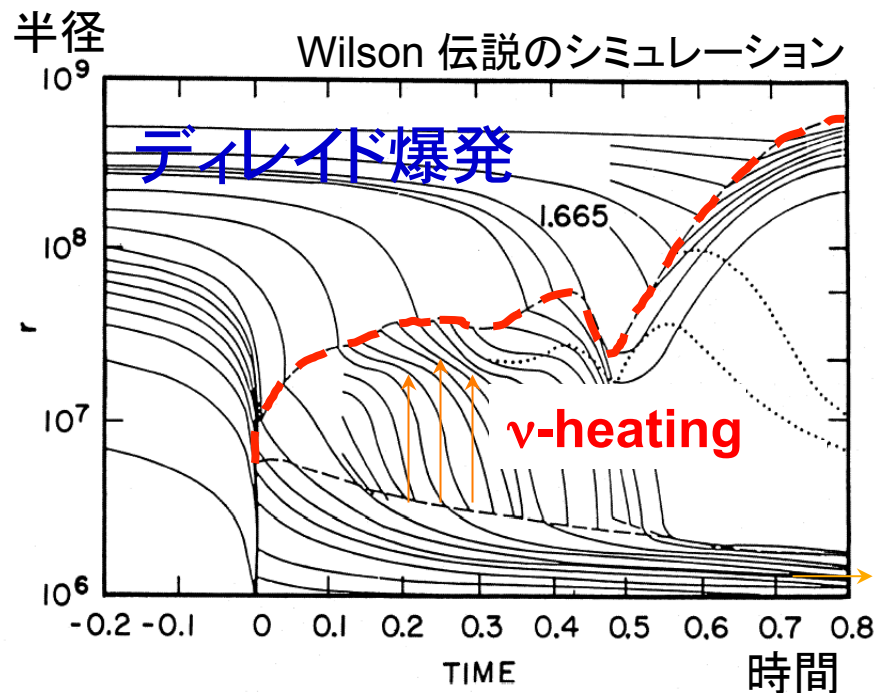
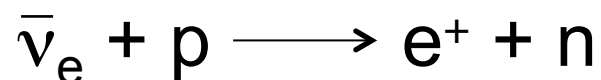
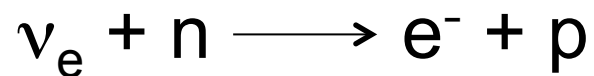
$E_{\text{loss}} \sim 10^{51} \text{erg}$

- 実際には、衝撃波は鉄コアの途中で停滞(stall)してしまう。

爆発のシナリオ: ニュートリノ加熱メカニズム

Bethe & Wilson ApJ (1985)

- ニュートリノ吸収反応で
衝撃波の後ろを温める



- ニュートリノ放出量・温度・組成 → 状態方程式・ ν 反応は？

状態方程式の影響：衝撃波は復活するか？

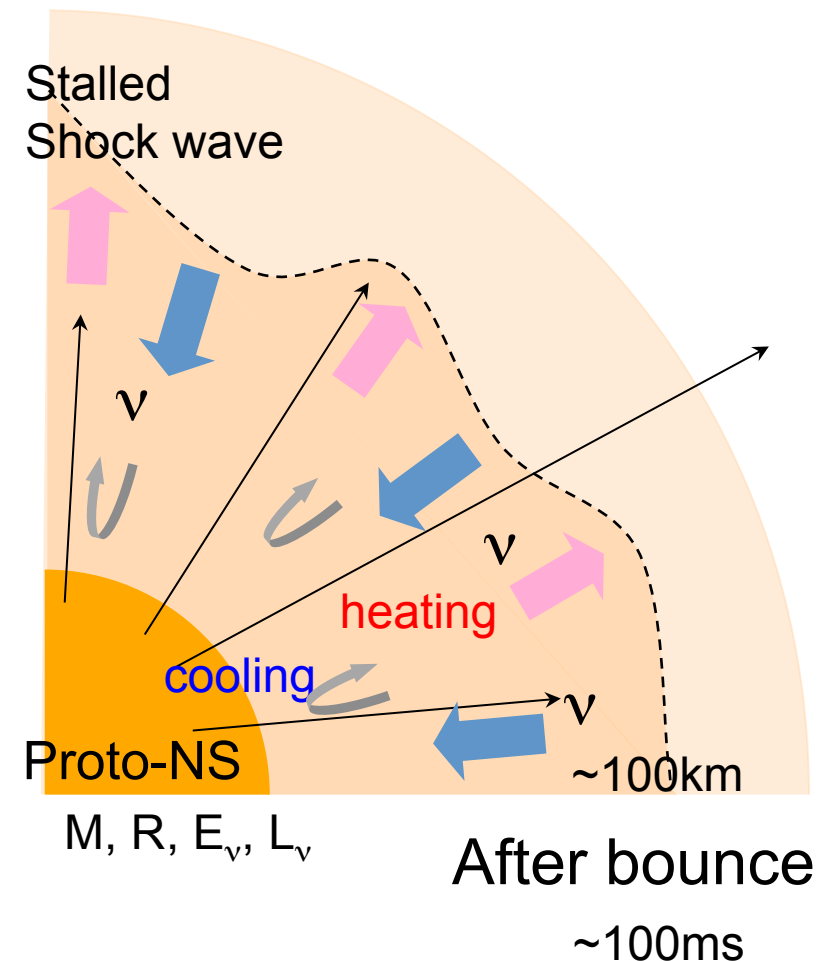
もしも、爆発させたいなら、、

- 状態方程式が柔らかく $> \rho_0$
内部の温度・密度 $\uparrow$
 ν 光度・エネルギー $\uparrow$
- 原始中性子星の表面 $\sim 10^{-2} \rho_0$
 ν が出やすい環境
- 停滞衝撃波の辺り $\sim 10^{-5} \rho_0$
 ν を吸収しやすい環境

ニュートリノ・重陽子反応 → 那須さん

多次元計算での影響を調べる必要
→ 諏訪さん

多次元流体ダイナミクス(対流,SASI等)
の中で ν 加熱・冷却

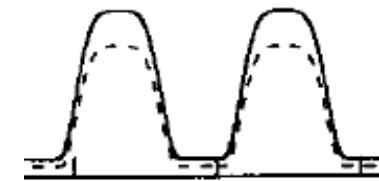
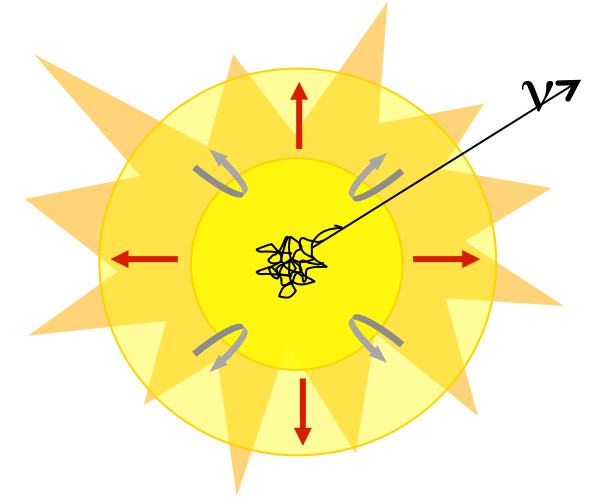


超新星の状態方程式データテーブル

核物質密度よりも高く、中性子過剰、有限温度

状態方程式(Equation of State; EOS)

1. 圧力-密度
 - 星の構造、ダイナミクス
 2. 温度(エントロピー)
 - ν -エネルギー分布, 平均エネルギー
 3. 組成(陽子, 中性子, ヘリウム, 原子核)
 - 原子核反応、ニュートリノ反応率
- **状態方程式データテーブル**
 - 密度: $10^5 \sim 10^{15} \text{ g/cm}^3$
 - 陽子の割合: $0 \sim 0.6$
 - 温度: $0 \sim 100 \text{ MeV}$
 - $(\rho, T, Y_e) : \varepsilon, p, S, \mu_n, \mu_p, X_i, m^*, \dots$



Uniform and
non-uniform matter

$$n_0 = 0.17 \text{ fm}^{-3} \\ (\rho_0 = 3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3)$$

Supernova EOS covering the wide range

- Parameterized EOS for systematic studies
 - Baron-Cooperstein, Takahara-Sato, Bruenn, Swesty, ... (late 80's)
- Supernova EOS for numerical simulations
 - Lattimer-Swesty EOS (1991) LS-EOS
 - *Extension of liquid-drop models (Skyrme-like)*
 - Shen, Toki, Oyamatsu & Sumiyoshi EOS (1998) Shen-EOS
 - *Relativistic Mean Field approach*
- Recent developments of EOS tables
 - Extensions with hyperons & quarks
 - Ishizuka JPG (2006), Nakazato PRD (2008), Sagert PRD (2009)
 - Mixture of nuclei
 - Furusawa et al. ApJ (2011), Newton, Botvina, Blinnikov, ...
 - G. Shen & Horowitz, Hempel & Schaffner, ...

Shen equation of state for supernovae

H. Shen, Toki, Oyamatsu & Sumiyoshi NPA, PTP(1998), ApJS (2012)

- Relativistic mean field theory+ local-density approx.
 - Based on relativistic Brueckner Hartree-Fock (RBHF) theory
 - Checked by exp. data of n-rich unstable nuclei: TM1
 - Nuclear structure: mass, charge radius, neutron skin,...
- Covers wide range of
 - Density: $10^{5.1} \sim 10^{16} \text{ g/cm}^3$
 - Proton fraction: $0 \sim 0.65$
 - Temperature: $0 \sim 400 \text{ MeV}$
- Data table $\sim 140 \text{ MB}$ (110 x 66 x 92 points)
 - Quantities: $\epsilon, p, S, \mu_i, X_i, m^*$
- >500 citations (332+169+15)

Shen-EOS

cc
Temperature= 1.000000E-01

5.100000E+00	7.581421E-11	-2.000000E+00	1.000000E-02
5.200000E+00	9.544443E-11	-2.000000E+00	1.000000E-02
5.300000E+00	1.201574E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02
5.400000E+00	1.512692E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02
5.500000E+00	1.904367E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02
5.600000E+00	2.397456E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02
5.700000E+00	3.018218E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02
5.800000E+00	3.799711E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02
5.900000E+00	4.783553E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02
6.000000E+00	6.022137E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02
6.100000E+00	7.581421E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02
6.200000E+00	9.544443E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02
6.300000E+00	1.201574E-09	-2.000000E+00	1.000000E-02
6.400000E+00	1.512692E-09	-2.000000E+00	1.000000E-02
6.500000E+00	1.904367E-09	-2.000000E+00	1.000000E-02
6.600000E+00	2.397456E-09	-2.000000E+00	1.000000E-02

<http://user.numazu-ct.ac.jp/~sumi/eos>

Extensions of Shen EOS tables

- Appearance of hyperons & quarks

Ishizuka et al. JPG (2006), Nakazato et al. PRD (2008)

EOS table	Framework	Nucleons	Hyperons	Quarks	Max. NS
Shen EOS 1998, NPA	RMF	n, p, α , nuclei	-	-	$2.2M_{\text{sun}}$
Hyperon EOS 2008, JPG	RMF in SU(3)	n, p, α , nuclei	Λ , Σ , Ξ	-	$1.6M_{\text{sun}}$
Quark EOS 2008, PRD	RMF + MIT bag model	n, p, α , nuclei	-	u, d, s	$1.8M_{\text{sun}}$

- Mixture of nuclei in NSE

Furusawa et al. ApJ (2011)

NSE EOS 2011, (ApJ)	RMF + NSE	n, p, α , NSE of nuclei	-	-	$2.2M_{\text{sun}}$
------------------------	-----------	-----------------------------------	---	---	---------------------

- Updates of Shen EOS (range, grids, Λ)

Shen et al. ApJS (2012)

状態方程式テーブルの比較

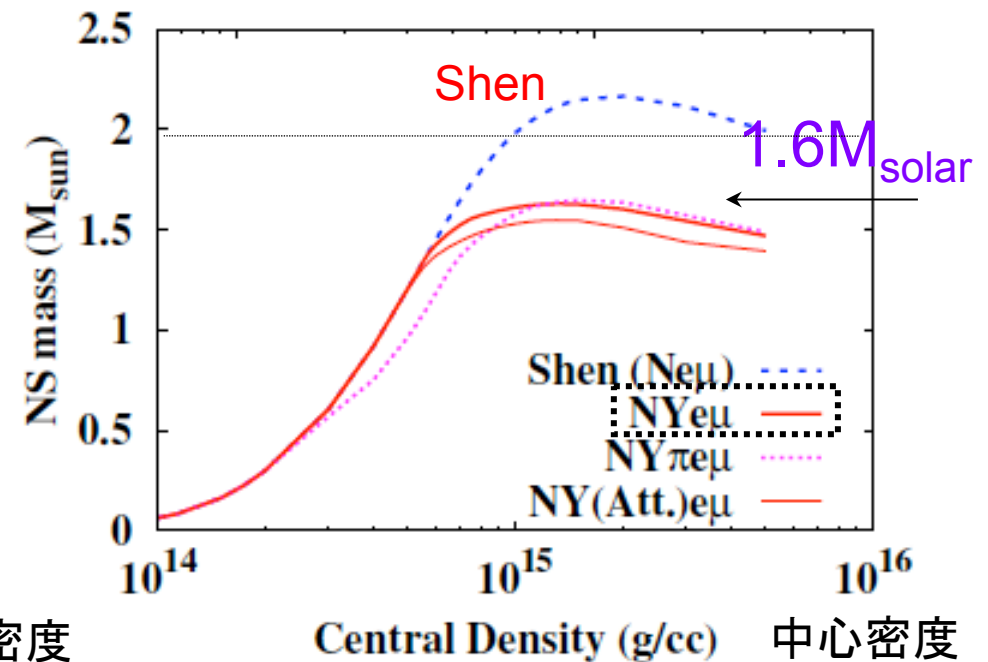
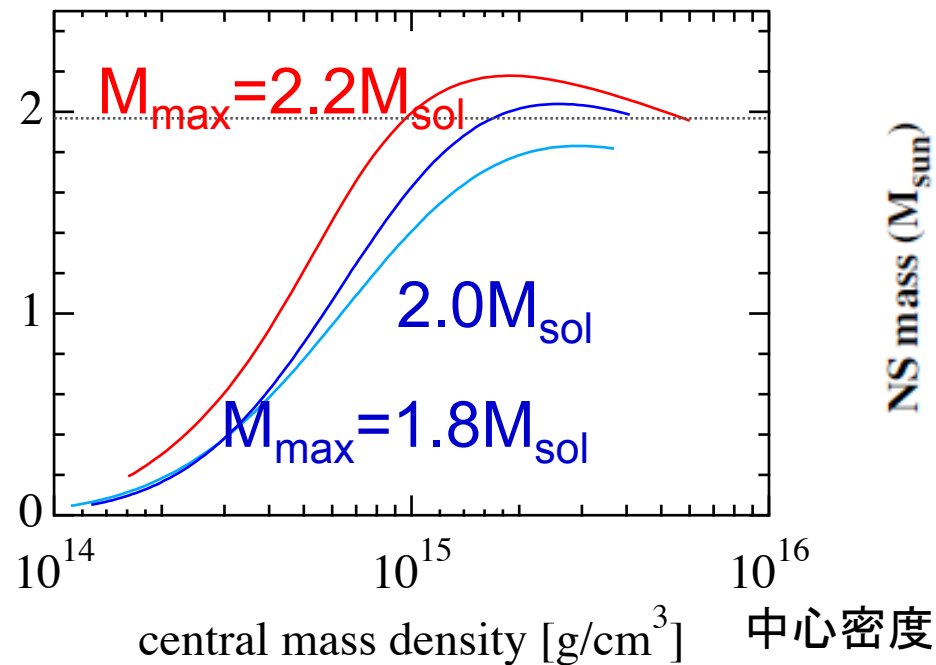
Shen-EOS vs LS-EOS

- 相対論的EOSは堅い cf. non-rel
 - Shen-EOS: $K=281$ MeV
 - LS-EOS: $K=180,220$ MeV

Shen-EOS vs Hyperon-EOS

- ハイペロン出現による軟化
 - Mixture starts from $\sim 2-3\rho_0$
 - Smaller maximum mass

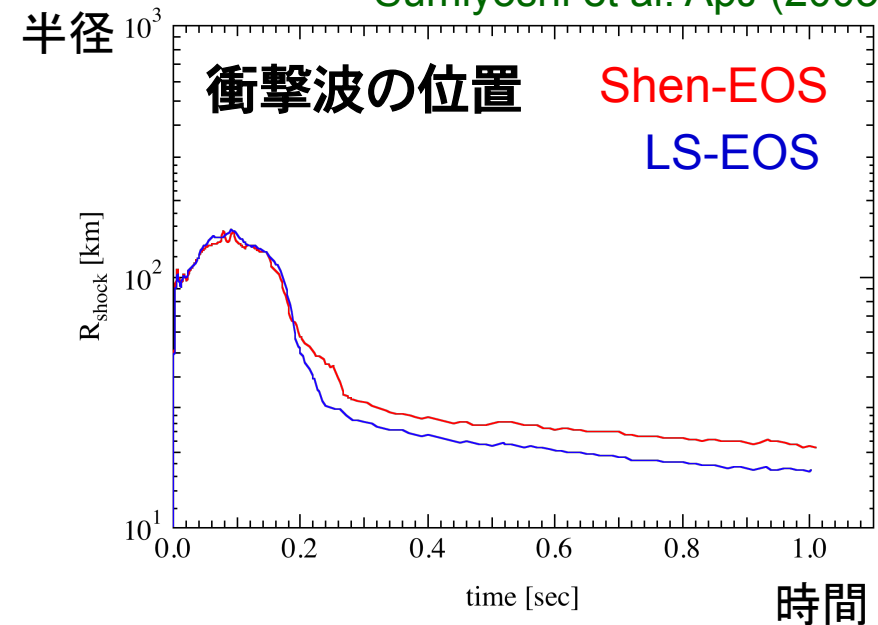
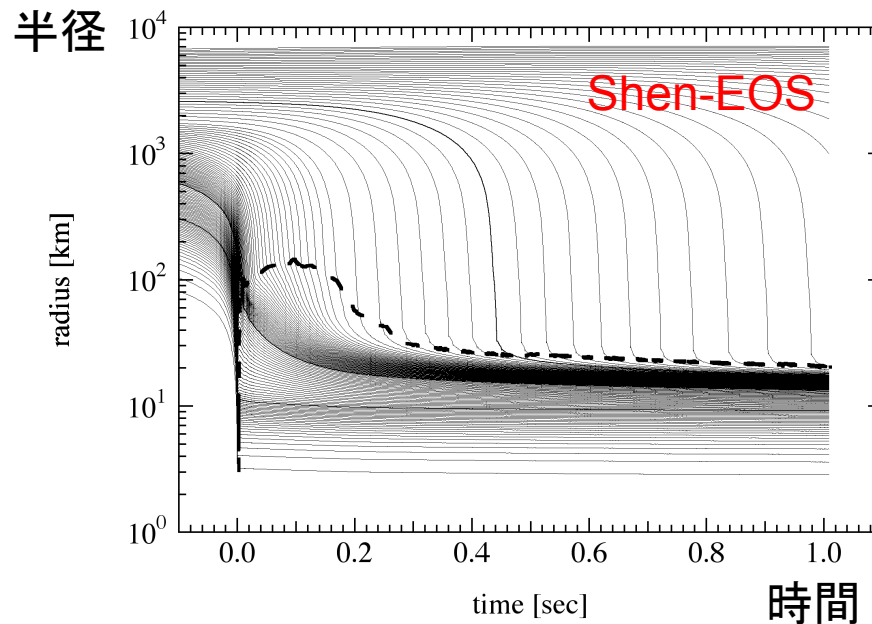
冷たい中性子星の質量



状態方程式テーブルを変えた場合(1D)

球対称では爆発していない、、、。

Sumiyoshi et al. ApJ (2005)



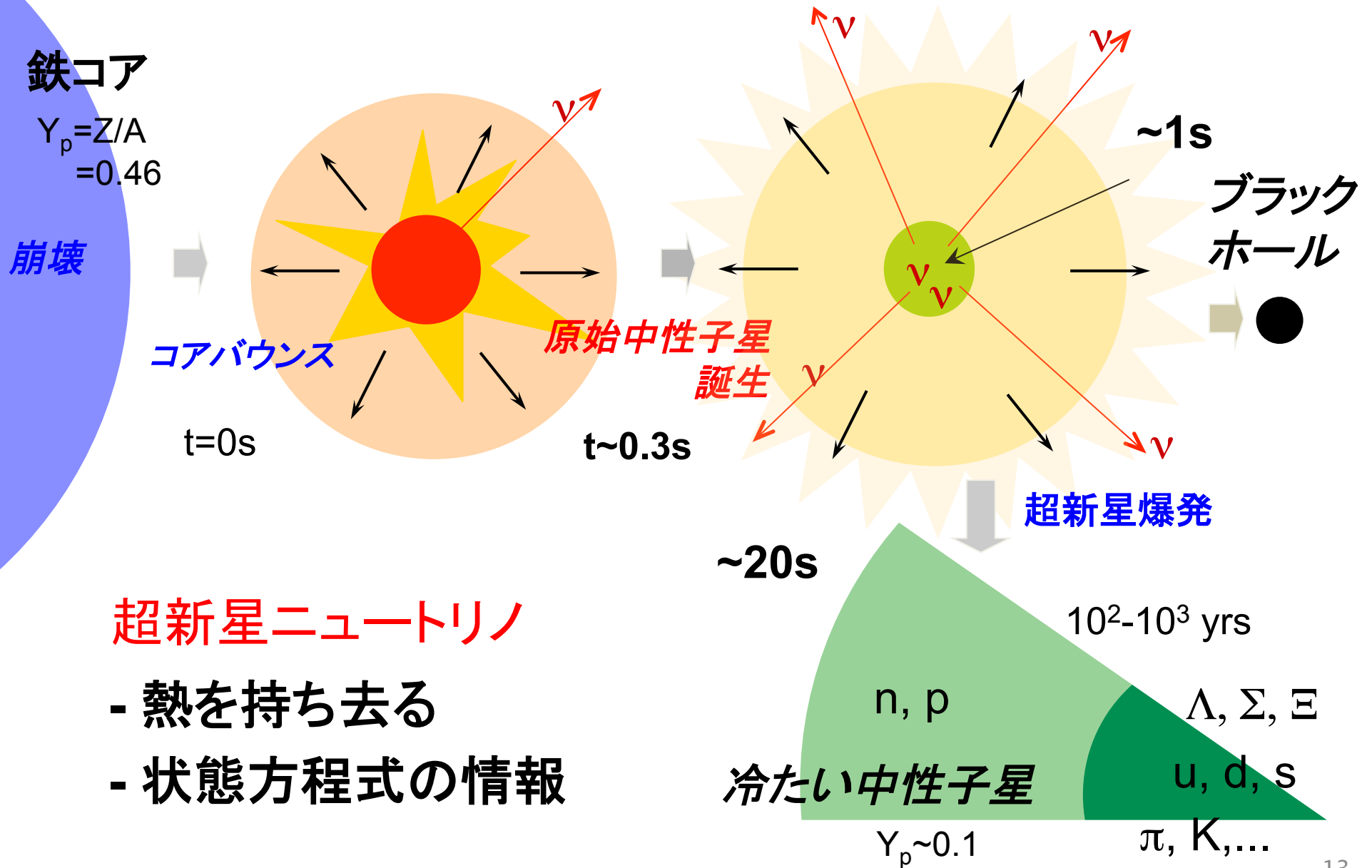
– 現実的な状態方程式の範囲では飛ばない

- バウンス時の密度にはあまり差がない。 $3.4 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ (Shen) vs $4.4 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ (LS)

– バウンス後の0.3s以降で差が現れる

- 原始中性子星に違い→ニュートリノ放出→ニュートリノ加熱・観測

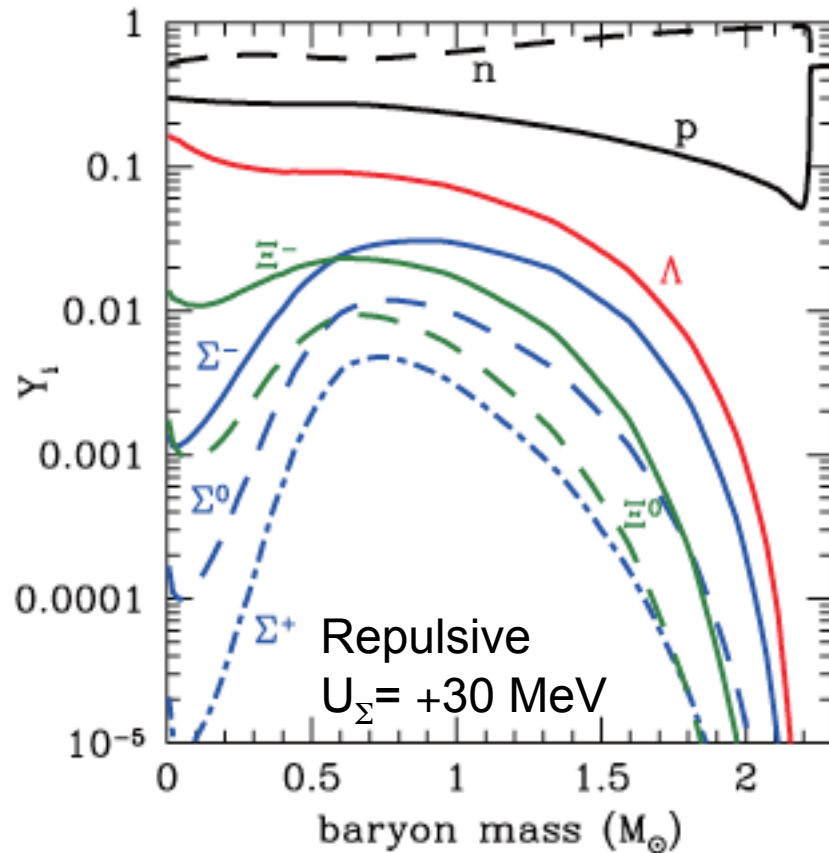
原始中性子星からのニュートリノ放出



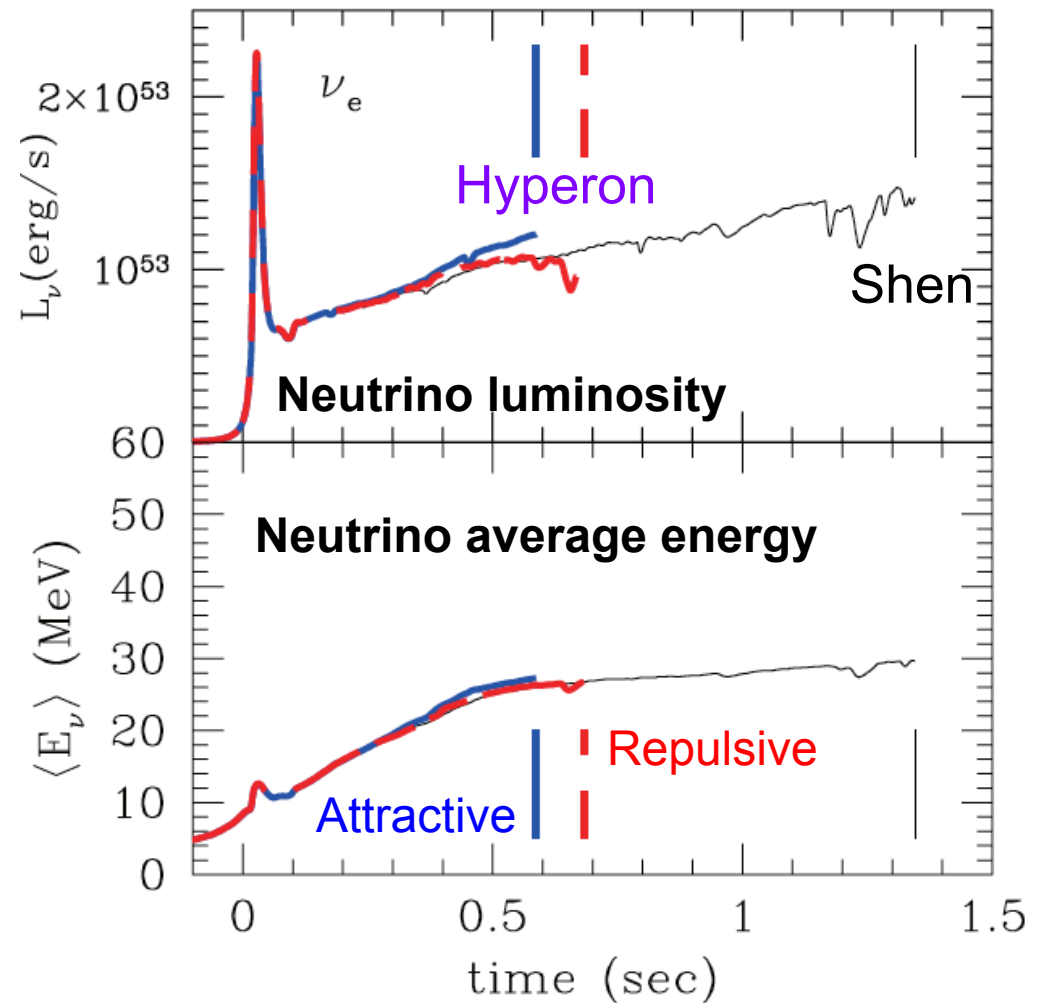
Neutrino burst from failed supernovae

- Probe EOS soft/stiff, hyperon-mixture $40M_{\text{sun}}$

Nakazato et al. ApJ (2012)



Hyperon mixture
in proto-neutron star

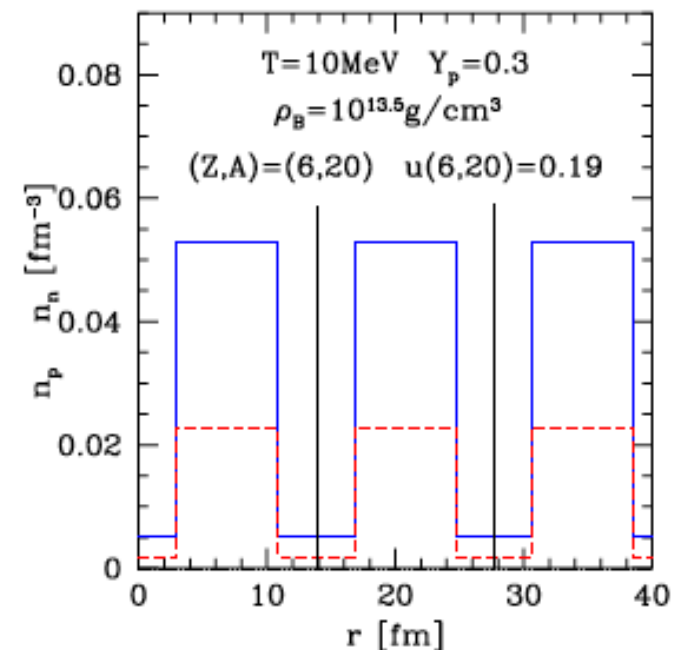
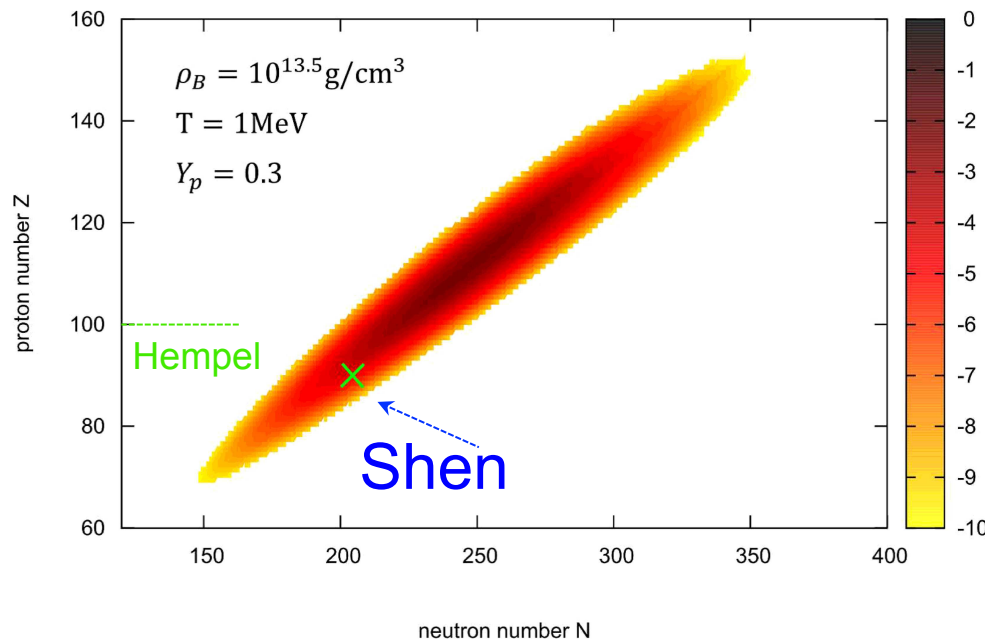


Extensions of Shen EOS table

Furusawa-EOS

Furusawa, Yamada, Sumiyoshi & Suzuki ApJ (2011)

- Relativistic Mean Field with Mixture of nuclei in NSE
 - Interaction: TM1 for uniform matter
 - Nuclear mass data & Compressible liquid drop model
 - Smooth connection from NSE to uniform matter
 - Provide $\langle A \rangle$, $\langle A^2 \rangle$ for neutrino-reactions



原子核組成の影響：重力崩壊・バウンス(1D)

電子捕獲 $\uparrow \rightarrow$ ニュートリノ閉込め $\downarrow \rightarrow$ 初期衝撃波エネルギー $\downarrow$

- 核種混合組成を考慮

Electron capture rates

- Bruenn (1985)

Simple formula

$N > 40$ blocked

- Langanke, Pinedo (2003)

Shell Model + RPA

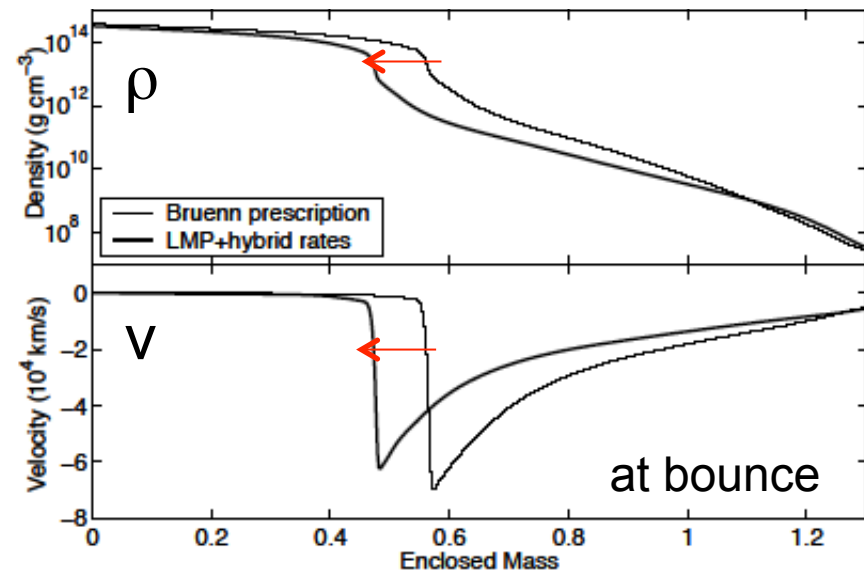
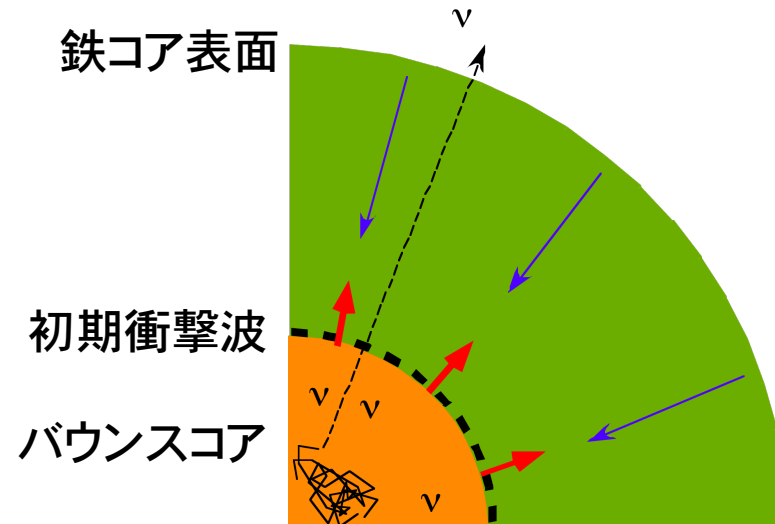
$45 < A < 112$

- バウンスコアサイズ $\downarrow$

衝撃波を阻む外層が増える

$$\Delta M_{in} = 0.1 M_{solar} \sim 1.6 \times 10^{51} \text{ erg} \downarrow$$

爆発エネルギーに匹敵

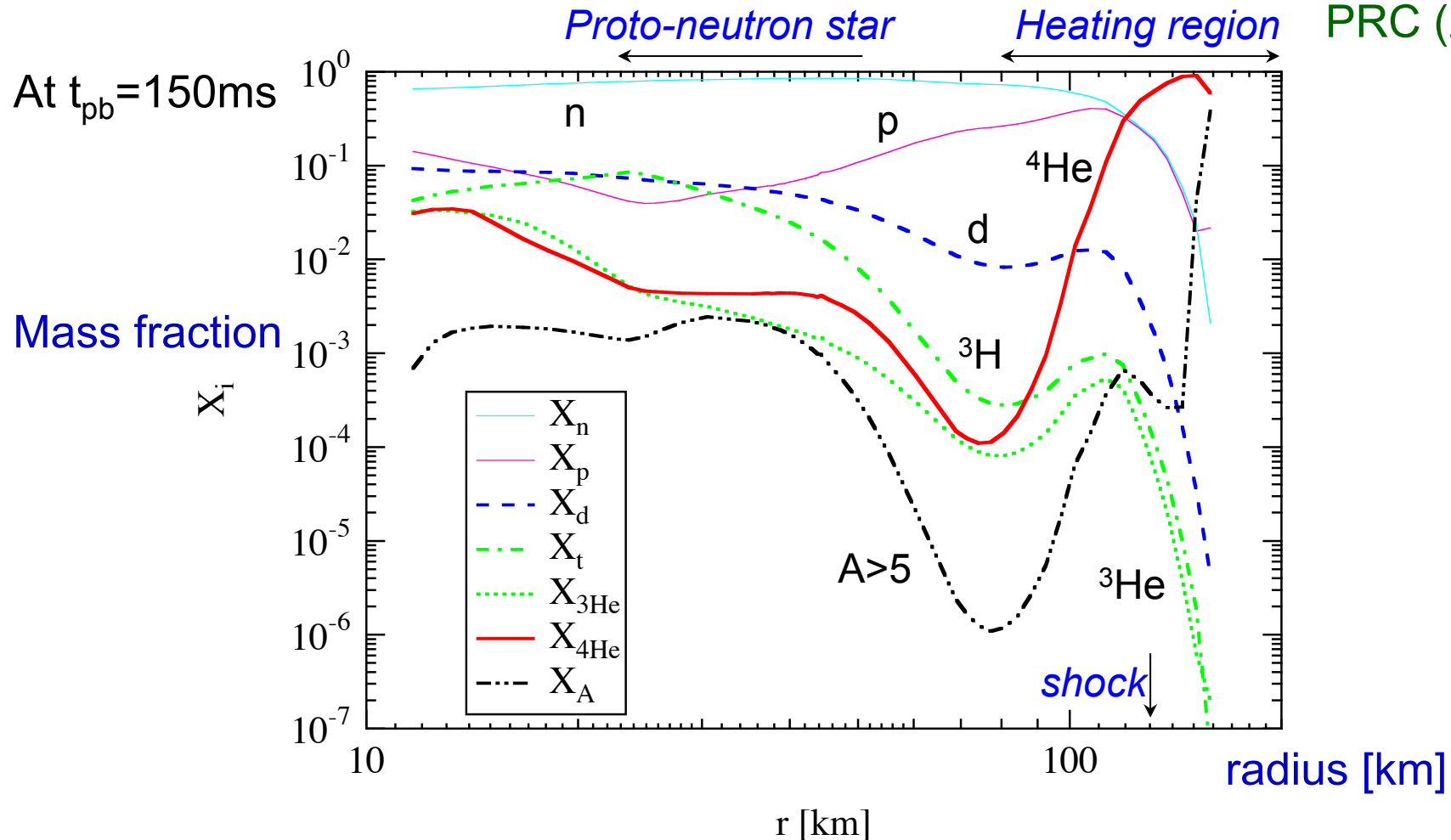


Hix et al. PRL (2003)

軽元素が大量に現れる(${}^4\text{He}$ だけではない)

$p, n, d, {}^3\text{H}, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}, \text{nuclei}$

Sumiyoshi & Röpke
PRC (2008)

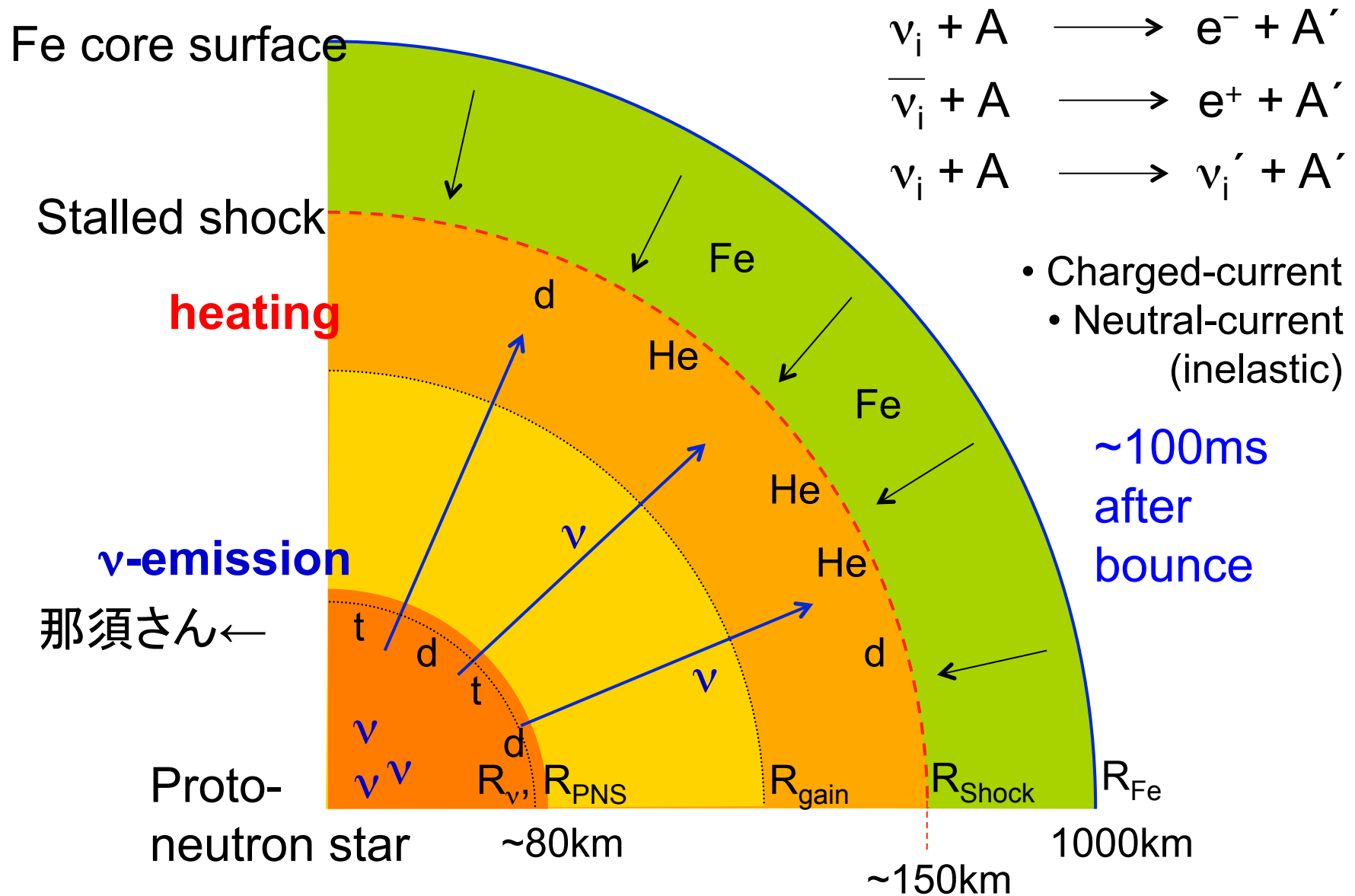


- ${}^4\text{He}$ abundant at $r > 100\text{km}$ → heating/cooling rates
- $d, t, {}^3\text{He}$ abundant at $r < 50\text{km}$ → ν -emission, absorption

See also. Arcones et al. PRC (2008)

ν -heating through nuclei

Haxton PRL (1988), Nakamura (2009)



状態方程式テーブルの課題

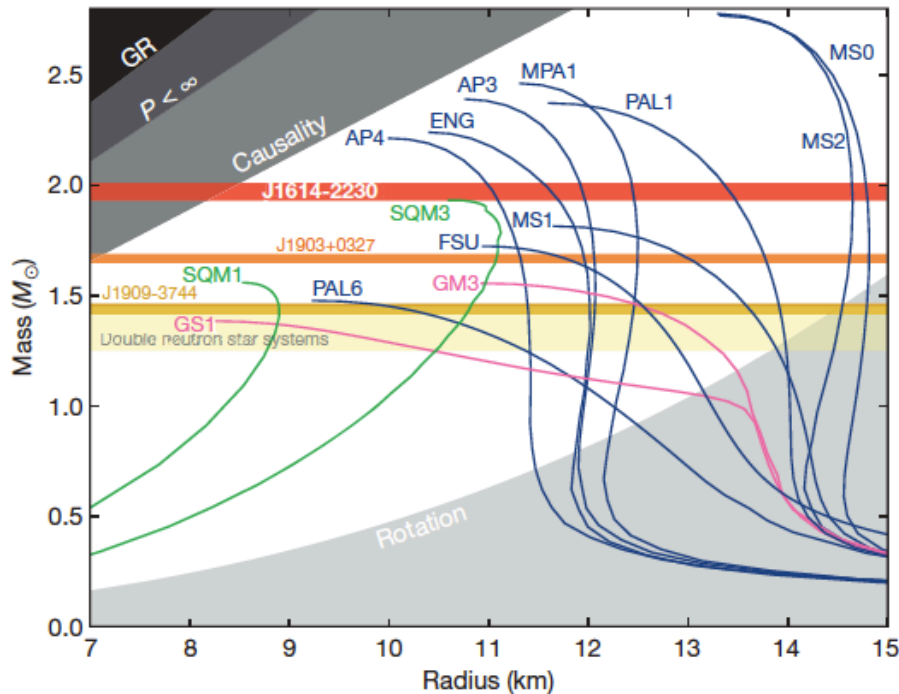
- 核子多体理論による本格派
 - 核力・ポテンシャル, latticeQCD, RMF計算との連携
→大西, 鷹野さん
- 系統的に影響を調べる方法(back to 80's?)
 - 2D, 3D超新星計算での系統的研究
 - 原子核データとの相関を見る(K , A_{sym} , L , ...)
→親松, 飯田さん
- ハドロン・クォーク相転移を扱う
- 中性子星の観測との整合性

新学術領域
「中性子星核物質」

中性子星観測からの情報

- NS mass, $1.97M_{\text{sun}}$

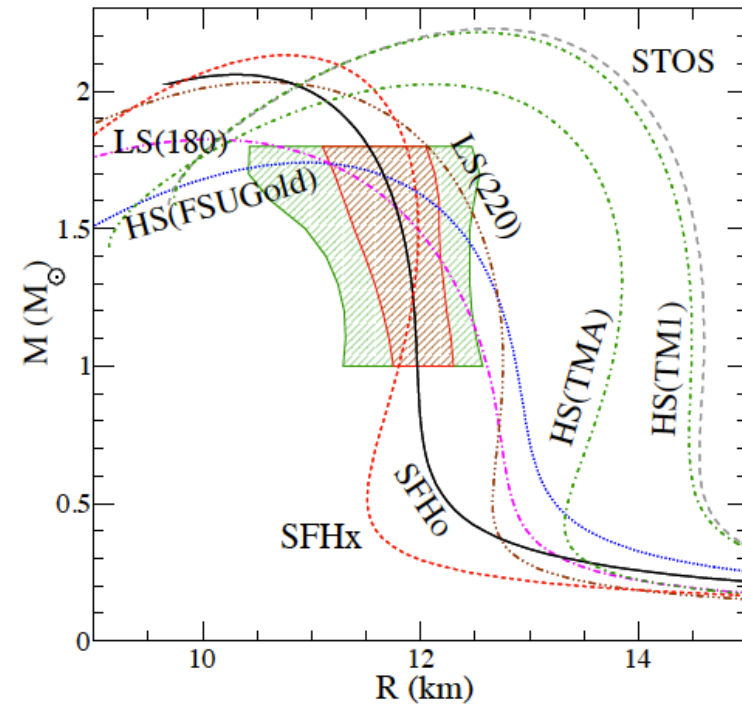
Demorest , Nature (2010)



No EOS table left??

- New EOS tables, small R

Steiner, arXiv:1207.2184v1



- Large $R > 14\text{km}$

Suleimanov et al. ApJ (2011)

超新星爆発における状態方程式

- 密度・温度・組成の広い範囲をカバー
- 超新星シミュレーションへの応用
 - 1D: 爆発していない, 超新星ニュートリノ予測
- 原子核組成による影響
 - 比較的低密度での組成・反応が重要
- 状態方程式は多次元計算でも重要である
 - Need systematic studies & ONLY 1 EOS table



←

滝脇さんは京コンピュータで計算中！

原子核・天文・計算科学の共同研究

- 超新星爆発

- 鈴木英之、中里健一郎
- 山田章一、長倉洋樹

- 計算科学

- 松古栄夫
- 櫻井鉄也、今倉暁

- 天文シミュレーション

- 固武慶、滝脇知也
- 関口雄一郎

- 状態方程式テーブル

- H. Shen
- 親松和浩
- 土岐博

- 状態方程式の拡張

- 古澤峻
- 大西明、石塚知香子
- 鷹野正利、富樫甫

- ニュートリノ反応

- 佐藤透、那須翔太、中村聡

新学術領域「計算科学による素核宇融合」

HPCI戦略P分野5「物質と宇宙の起源と構造」課題3

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