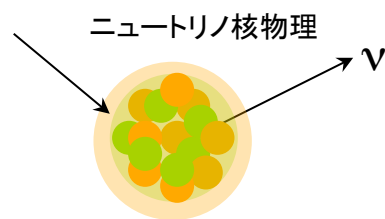
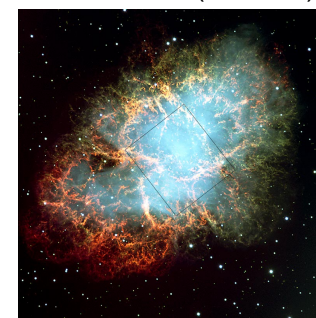


超新星爆発メカニズムとニュートリノ反応



住吉光介(沼津高専)

かに星雲 (SN1054)



hubblesite.org

- 超新星爆発の大規模計算の現状
- 爆発メカニズムにおける原子核データ

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

超新星爆発メカニズム解明の鍵

- Macrophysics

- 流体力学
- ニュートリノ輻射輸送
- 回転、磁場



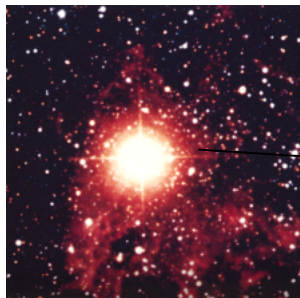
- Microphysics (核物理)

- 状態方程式
- ニュートリノ反応率
- 電子捕獲反応

大規模数値シミュレーション

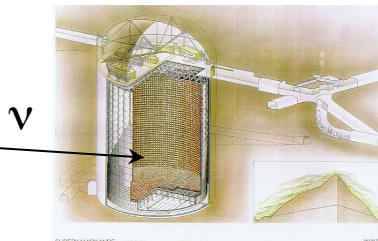
並列計算技術

爆発・高密度天体



SN1987A

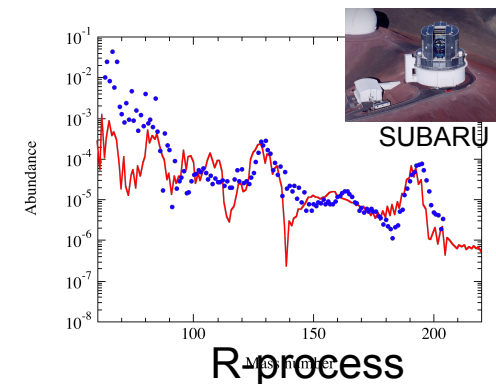
ニュートリノ観測など



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

Super-Kamiokande

元素合成



重力崩壊型超新星の爆発シナリオ

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

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

$\sim 10 \text{ km}$

中性
子星

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

重力崩壊から爆発へ:エネルギー収支

- 鉄コアから中性子星へ ($M_{\text{core}} \sim 1.4 M_{\text{solar}}$)

- $R_{\text{Fe}} \sim 10^3 \text{ km} \rightarrow R_{\text{NS}} \sim 10 \text{ km}$

- $\rho_c \sim 10^{10} \text{ g/cm}^3 \rightarrow \rho_c \sim 10^{15} \text{ g/cm}^3$

- 重力エネルギーの解放

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

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

- ニュートリノ放出: $E_{\nu} \sim 10^{53} \text{ erg}$

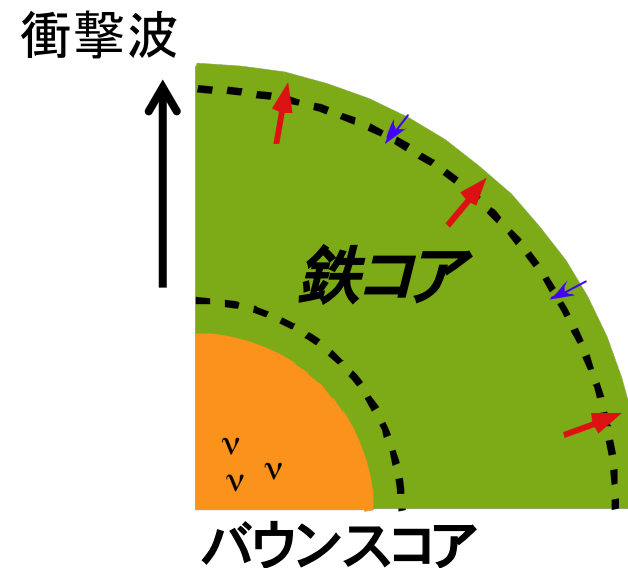
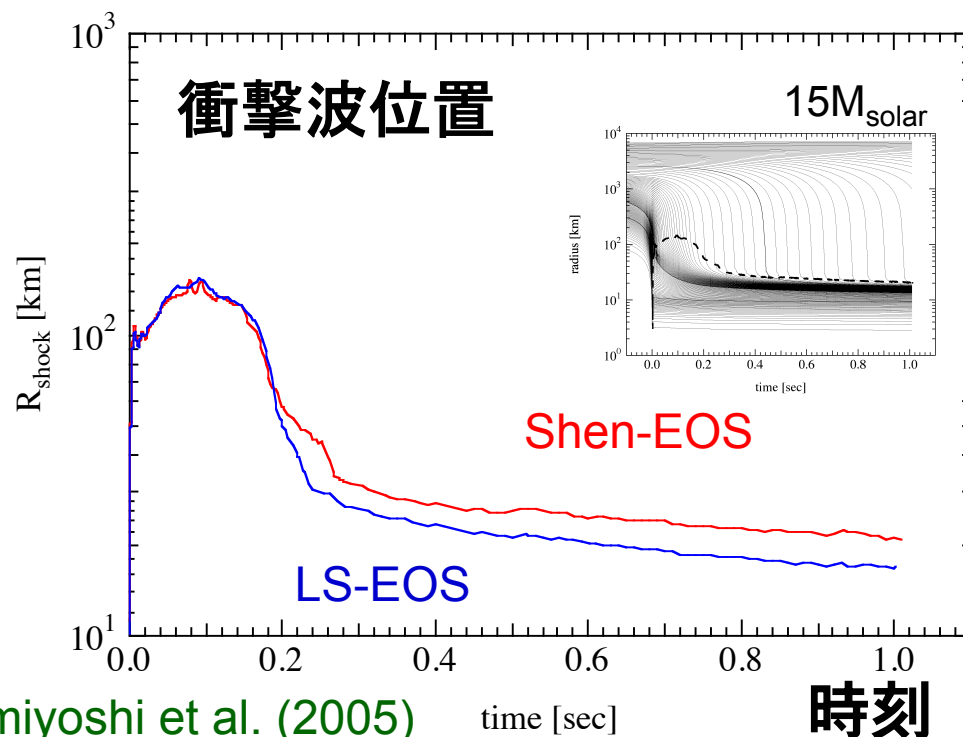
- わずか $\sim 1\%$ が爆発に使われる

- ニュートリノ物質相互作用が重要

→緻密な計算が必要

球対称の計算では爆発していない

1Dニュートリノ輻射流体計算: 第一原理計算



衝撃波が途中で停滞

初期の衝撃波エネルギー

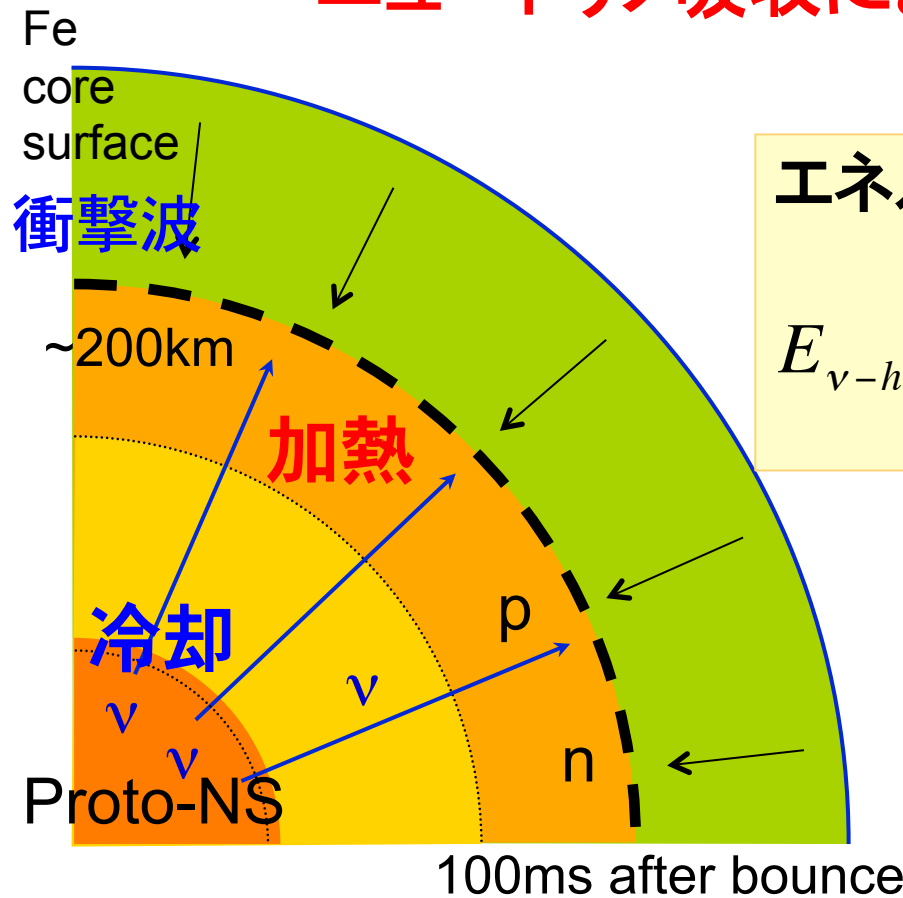
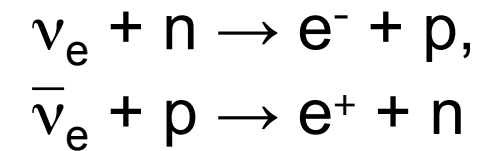
$$E_{\text{shock}} \sim \frac{GM_{\text{inner}}^2}{R_{\text{inner}}} = \text{several} \times 10^{51} \text{ erg}$$

エネルギー損失: 鉄分解による

$$E_{\text{loss}} \sim -1.6 \times 10^{51} \left(\frac{M_{\text{outer}}}{0.1M_{\text{solar}}} \right) \text{ erg}$$

ニュートリノ加熱メカニズムによる衝撃波復活

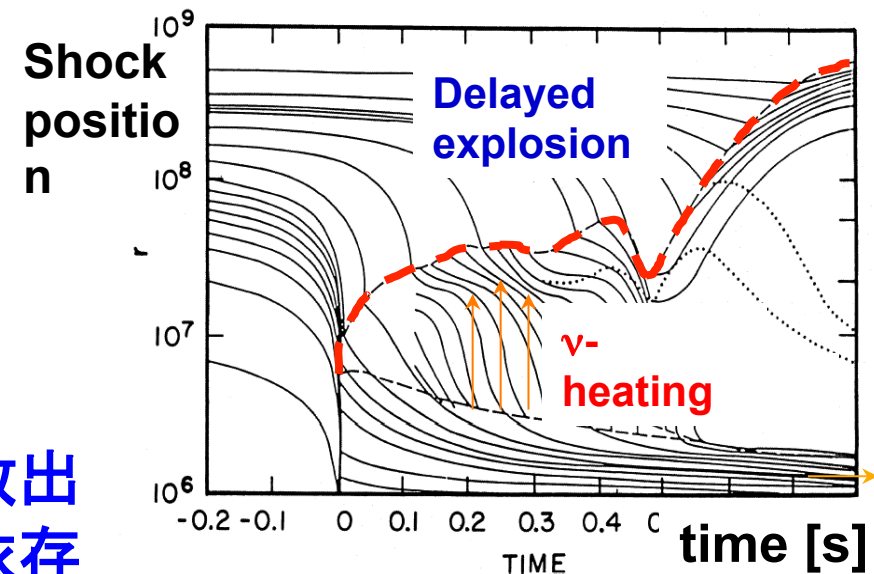
ニュートリノ吸収による加熱



エネルギー移行量 from ν

Janka A&A (1996)

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



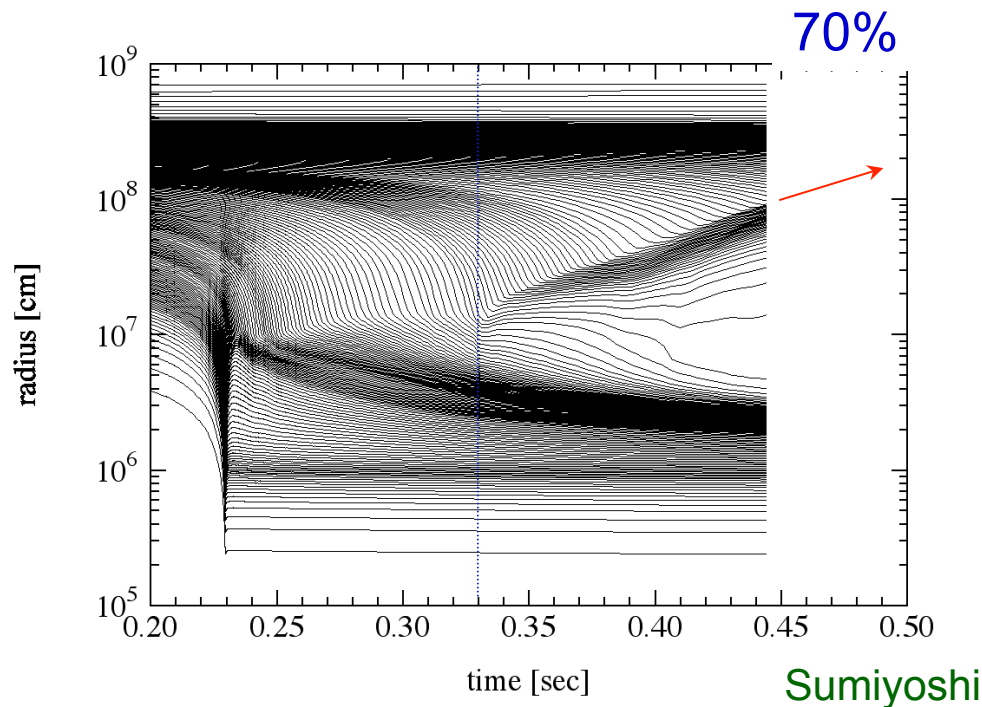
Bethe & Wilson ApJ (1985)

原始中性子星からのニュートリノ放出
加熱領域での吸収率・時間に依存

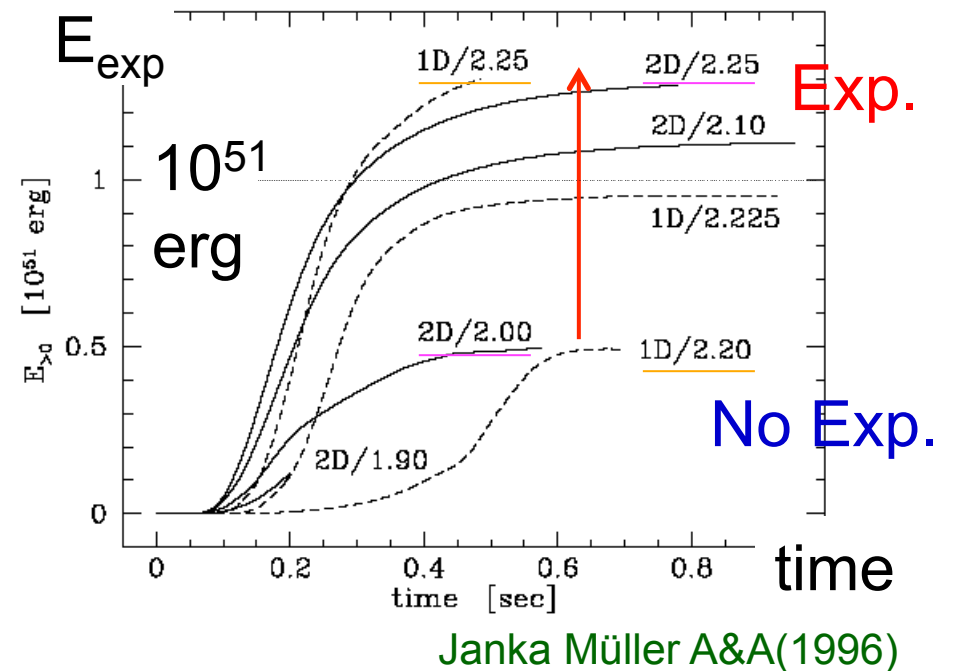
爆発の可否への影響は大きい

10~20 %の加熱率変動でも爆発の可否に影響がありえる

- ν 加熱の依存性
核子吸収による加熱を30, 50, 70%
増加させてみる (from $t_{pb}=100$ msec)



- ν 光度 L_ν の3~12%の変化
爆発に転ずる(1D, 2D)
- threshold付近



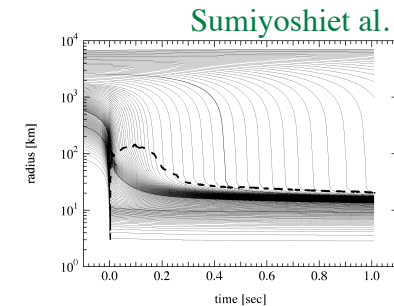
- ニュートリノ輻射輸送による緻密な計算が必要

超新星爆発メカニズム：研究の現状

- 1D: 球対称

爆発しない：第一原理計算

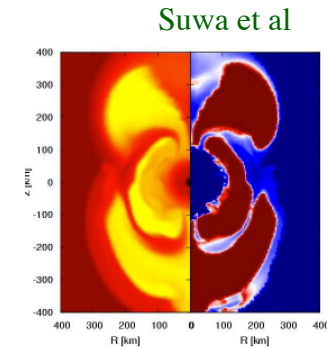
核物理の影響を吟味



- 2D: 軸対称

爆発する例が出てきた

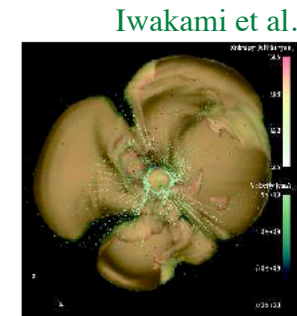
メカニズムは未確定、エネルギー不足



- 3D: 対称性を課さない

初めての計算へ

新たなダイナミクスの探索



緻密な核物理をつぎ込んだ

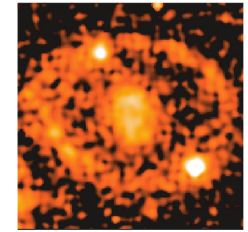
多次元の数値シミュレーションが必要

多次元計算: 非対称性の役割が明らかに

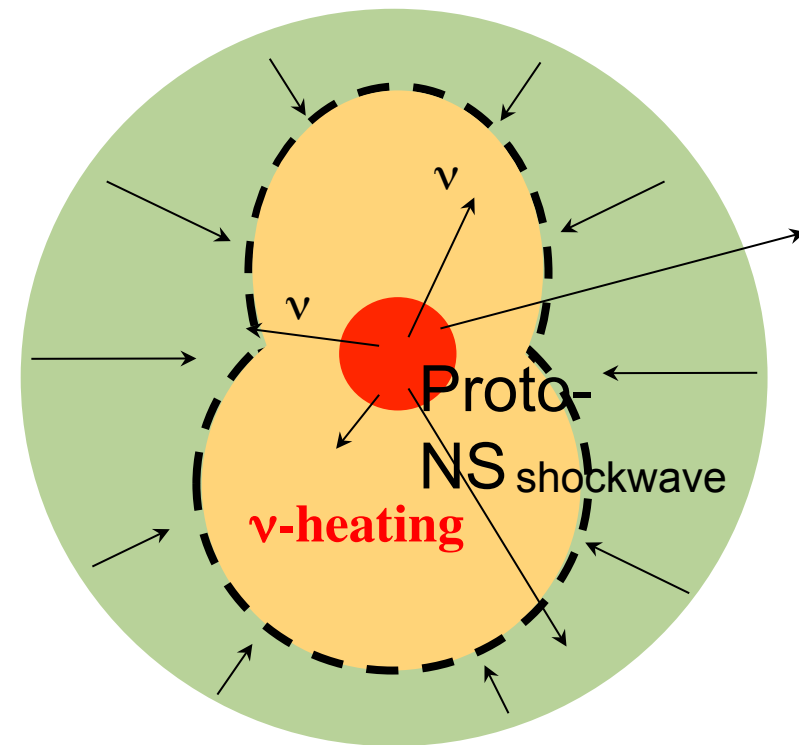
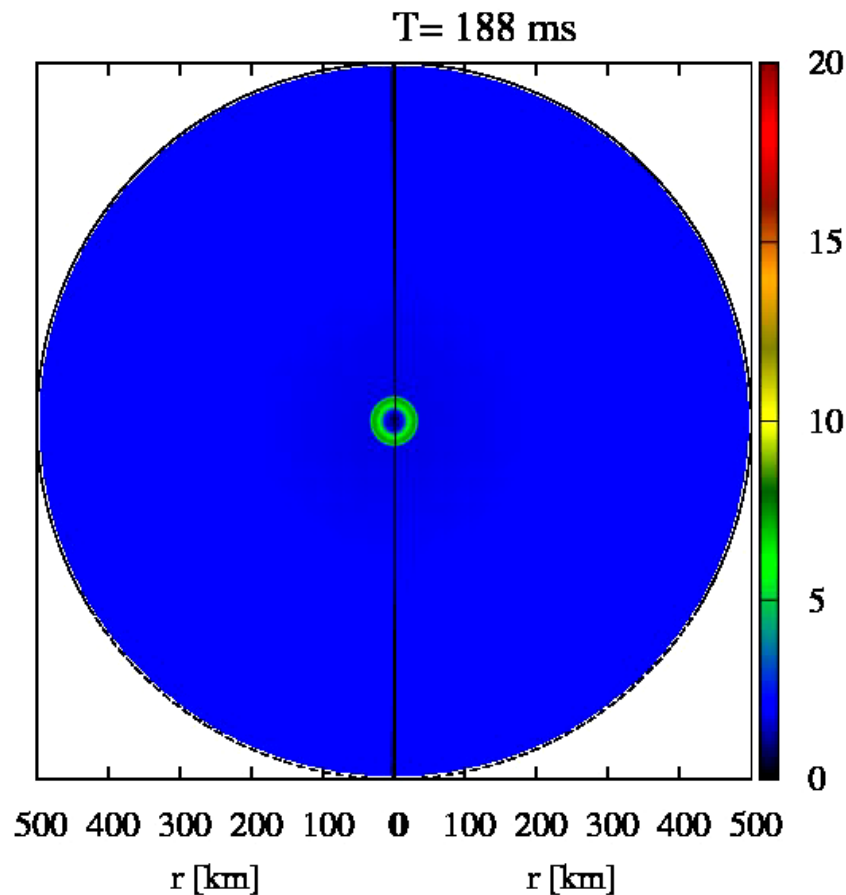
対流, 回転, 非等方 ν 放射, 磁場,... 観測による傍証

流体不安定性とニュートリノ加熱

SN1987A



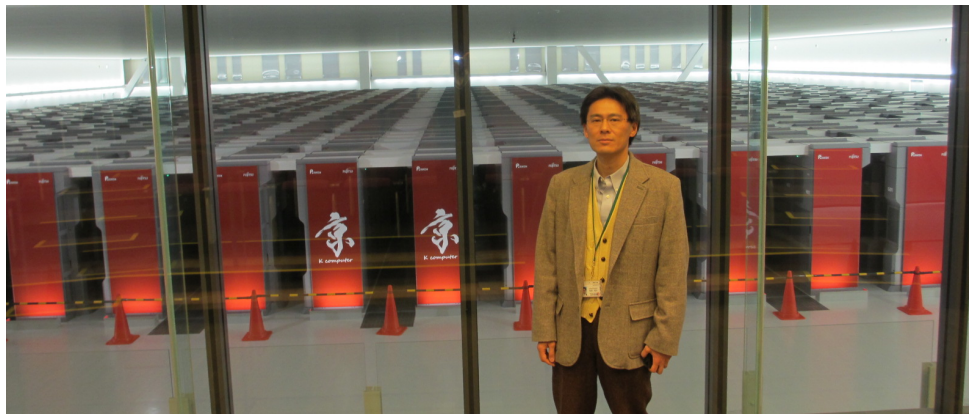
Wang (2002)



多次元でのニュートリノ加熱

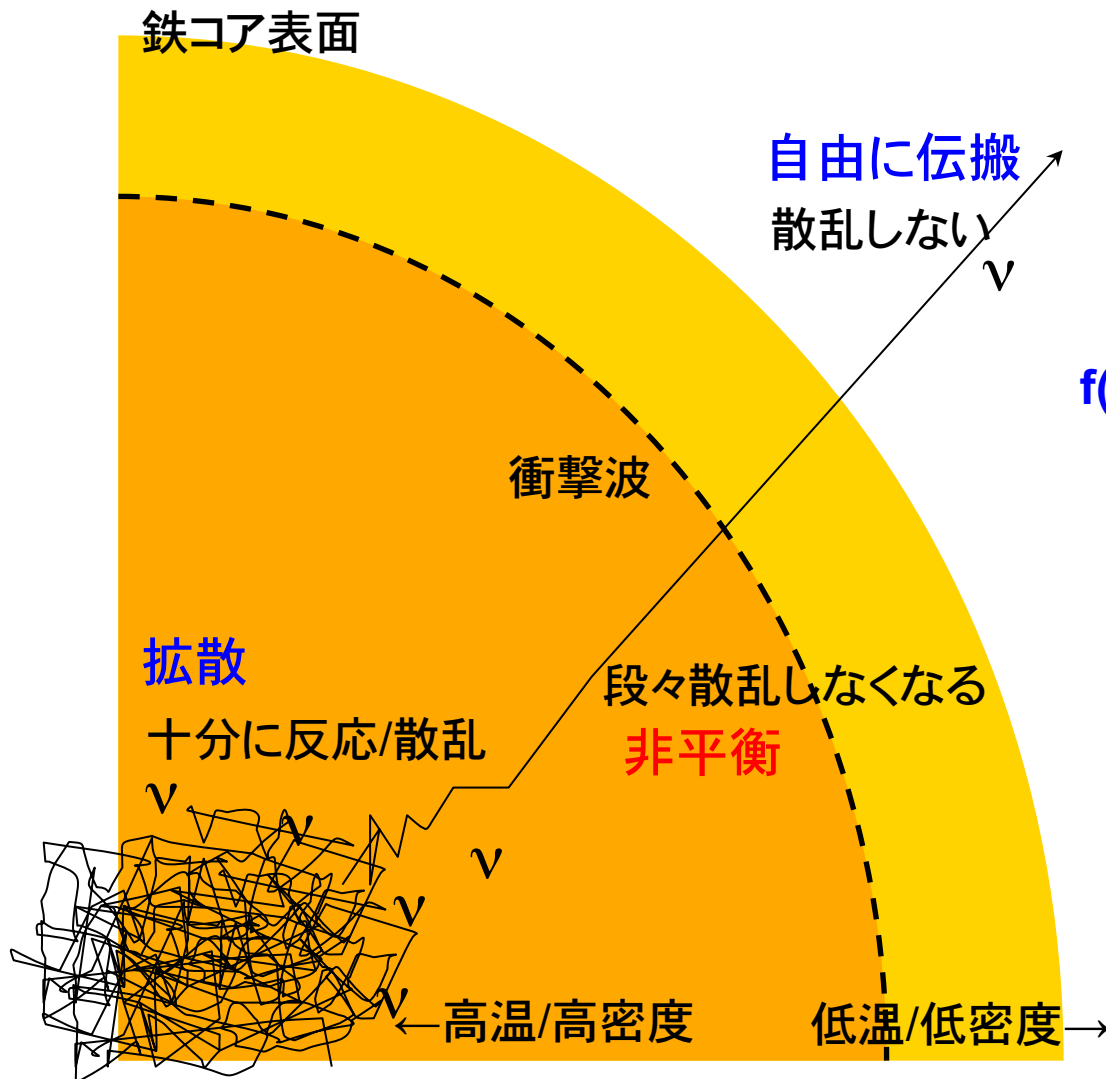
ニュートリノ輻射輸送が鍵

加熱量：ニュートリノから物質へ



鍵を握るニュートリノ輻射輸送

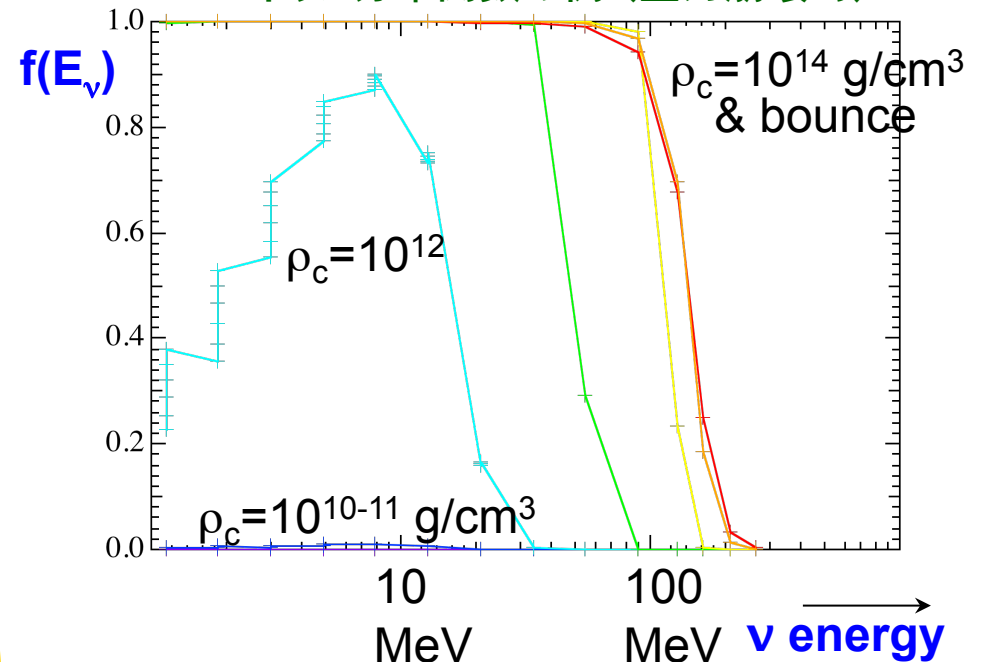
- 星内部から ν が出てくるまでを計算: ボルツマン方程式
 - ν の伝搬、 ν 散乱・吸収・放出反応を追う



・溜まる・出て行く ν の量

・バウンス・加熱メカニズム

ニュートリノ分布関数の例 (重力崩壊時)

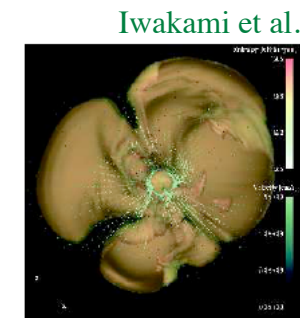
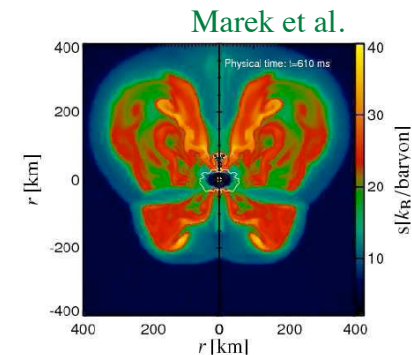
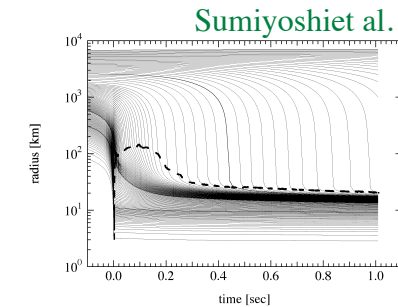


ν 輻射輸送: 近似から厳密計算へ

- 1D: 第一原理計算
核物理の影響の検証
 - ニュートリノ放出の予測
- 2D: 近似的な計算法
系統的な研究が必要
 - 違う状態方程式、鉄コアモデル
- 3D: 簡単な扱いから脱却へ
世界初の計算が日本から
 - 2次元と違う振る舞いか？

ν 輻射輸送計算の近似がない

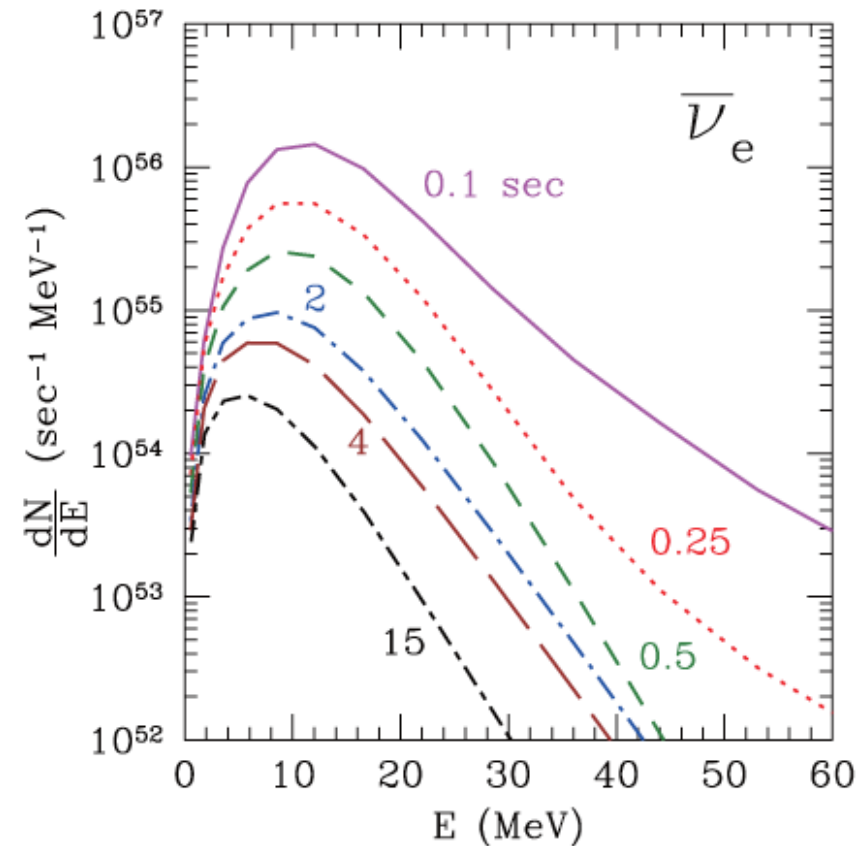
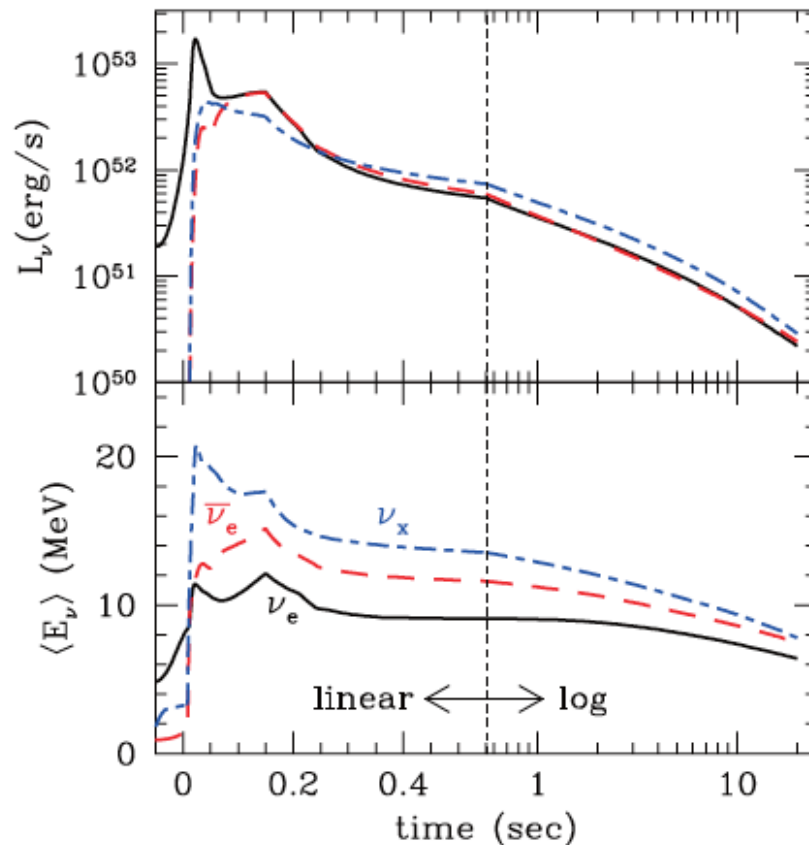
多次元の数値シミュレーションが必要



超新星ニュートリノデータベース

Nakazato et al. ApJS (2013)

- GR 1D-simulation of Hydro & Proto-NS



Supernova Neutrino Database

asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/

Google Weather Journals Research Database Travel Conference Deutschland News Shopping Sumi LEGO

Supernova Neutrino Database

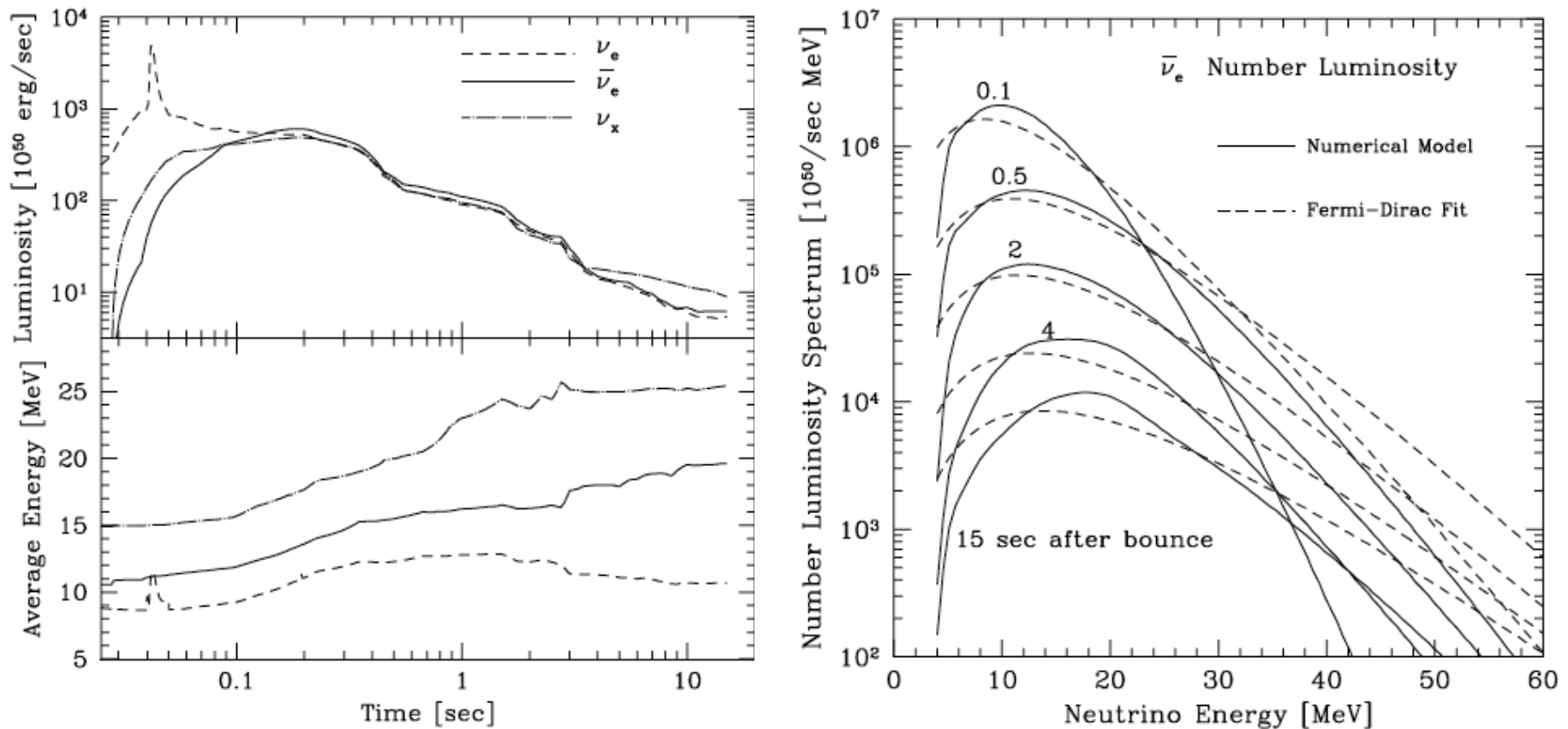
Web site of Supernova Neutrino Database

Abstract

Conventional data of Supernova ν

Totani, Sato, Dalhed & Wilson, ApJ (1998)

- 昔の爆発モデルによるデータが使われて来た

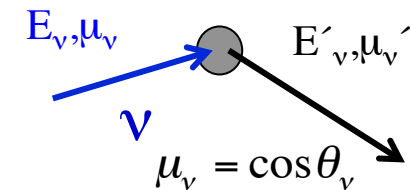


特徴: 温度が高い, エネルギーの違いが大きい

ニュートリノ輻射輸送方程式

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

- 保存形: 差分化して解く (S_n法)
- 時間に関して陰解法 (Stiff)



$$\frac{1}{c} \left(\frac{\delta f_\nu}{\delta t} \right)_{collision} = j_{emission} (1 - f_\nu) - \frac{1}{\lambda_{absorption}} f_\nu + C_{scattering} \left[\int f_\nu (E'_\nu, \mu'_\nu) dE'_\nu \right]$$

- 衝突項: 全てのν吸収・放出・散乱過程
 - 散乱前後のエネルギー・角度ごとに積分計算
 - 状態方程式に依る組成・ニュートリノ反応率、相対論

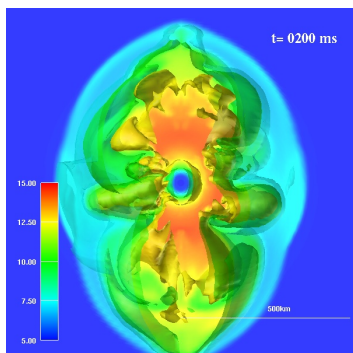
3次元超新星コアにおけるニュートリノ輻射輸送

Sumiyoshi & Yamada, *Astrophys. J. Suppl.* 199 (2012) 17

6Dボルツマン方程式を解く計算コード

3D超新星コアでのニュートリノ輻射を調べる

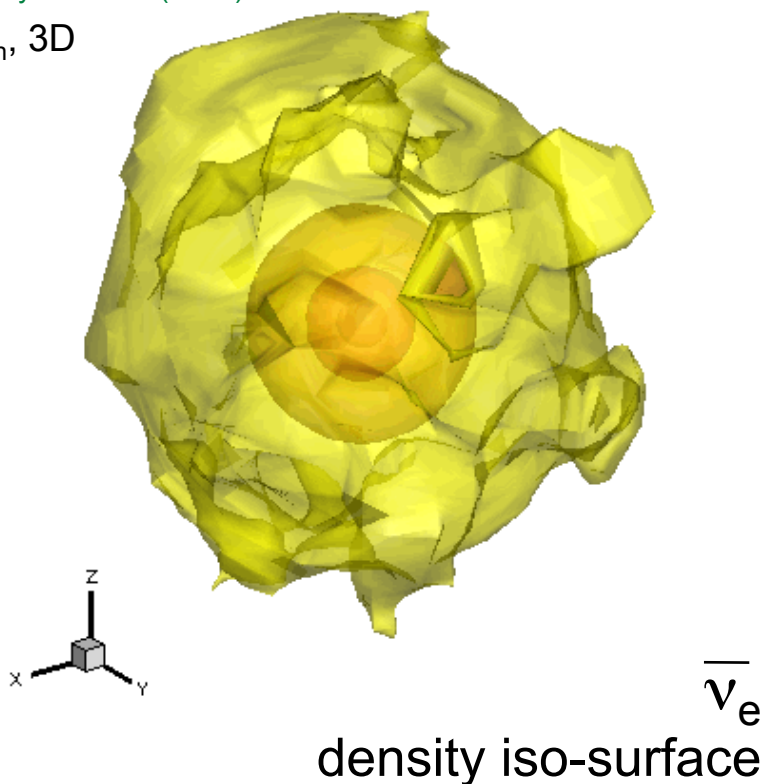
ニュートリノ密度, フラックス, スペクトル, 加熱率



3D profile by Takiwaki (2012)

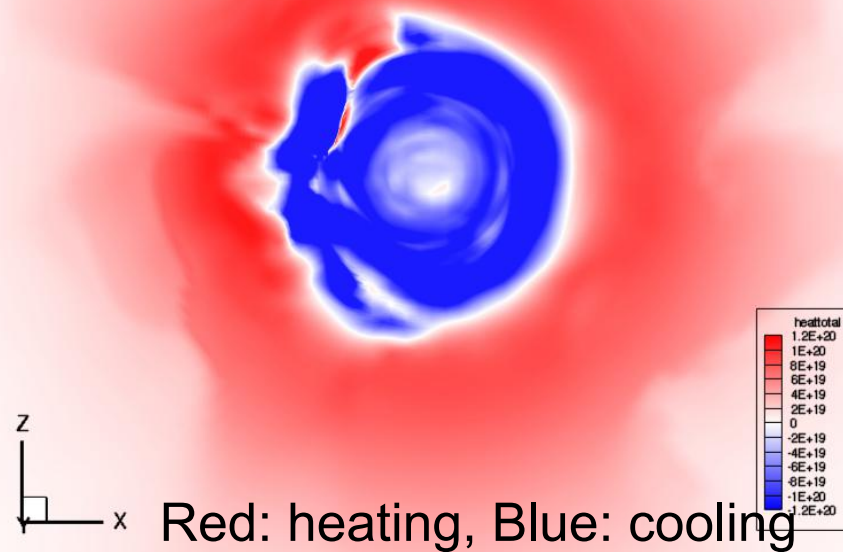
$11.2M_{\text{sun}}$, 3D

200ms



density iso-surface

ν -heating/cooling rates in 3D



核物理データの役割

状態方程式とニュートリノ反応

核物理データセットの役割

- 状態方程式

Lattimer-Swesty
Shen

- 流体ダイナミクス・中性子星の形成
- 放出ニュートリノのエネルギー・流束

- ニュートリノ・電子捕獲反応($E_\nu=10-100$ MeV)

- ν 吸収・放出・対生成: 物質の加熱・冷却
- ν 散乱: 平均自由行程

FFN, Bruenn
Langanke-Pinedo

- 広い範囲の密度・温度・組成、核図表をカバー

- 実験データでチェック、一貫した枠組み

→ 超新星の数値シミュレーションに組み込む

超新星の状態方程式データテーブル

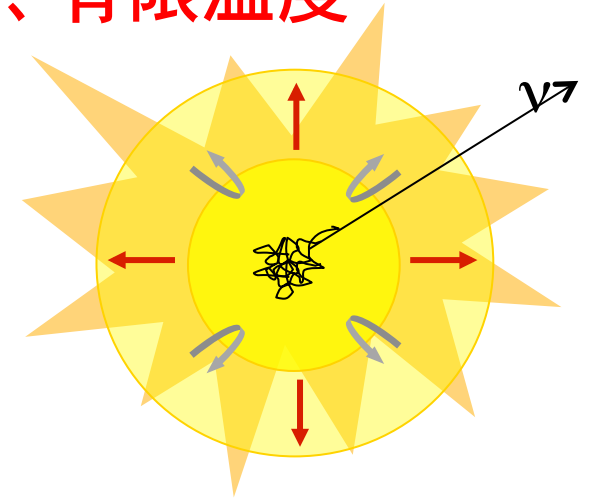
核物質密度よりも高く、中性子過剰、有限温度

狀態方程式(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
 - Lattimer Swesty EOS (1991)
 - Shen, Toki, Oyamatsu & Sumiyoshi (1998, 2003)
 - Extension with hyperons, quarks (Ishizuka, 2003)



Uniform and non-uniform matter



Shen-EOS

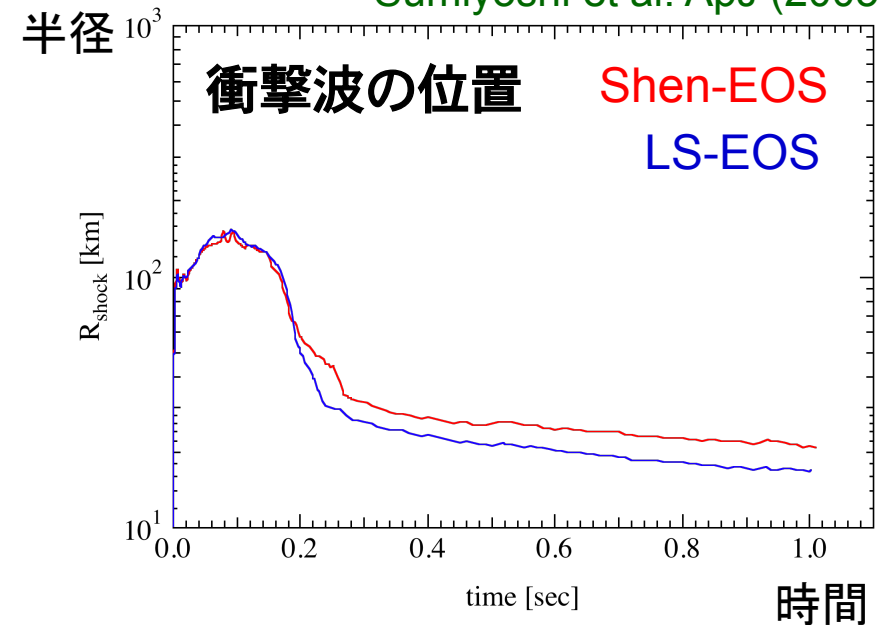
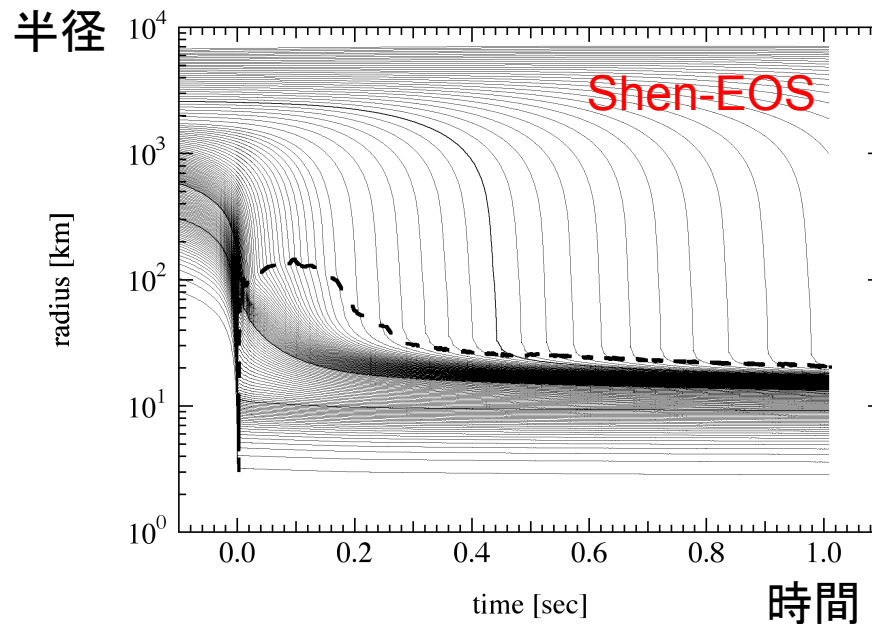
```
Temperature= 1.00000E-01
```

5.100000E+00	7.581421E-11	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.52
5.200000E+00	9.544443E-11	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.50
5.300000E+00	1.201574E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.48
5.400000E+00	1.512692E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.45
5.500000E+00	1.904367E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.43
5.600000E+00	2.397456E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.41
5.700000E+00	3.018218E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.39
5.800000E+00	3.799711E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.36
5.900000E+00	4.783553E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.34
6.000000E+00	6.022137E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.32
6.100000E+00	7.581421E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.30
6.200000E+00	9.544443E-10	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.27
6.300000E+00	1.201574E-09	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.25
6.400000E+00	1.512692E-09	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.23
6.500000E+00	1.904367E-09	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.21
6.600000E+00	2.397456E-09	-2.000000E+00	1.000000E-02	-1.19

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

核物理の影響：衝撃波は復活するか？

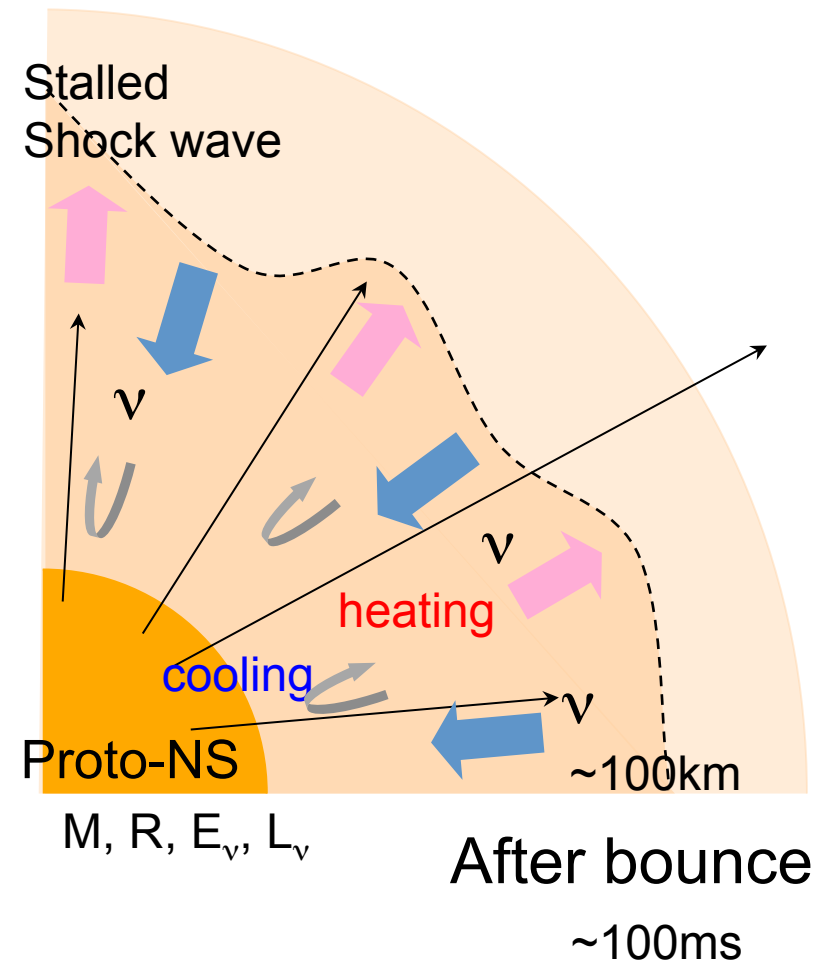
もしも、爆発させたいなら、、

- 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

原子核組成

ニュートリノ・軽元素反応

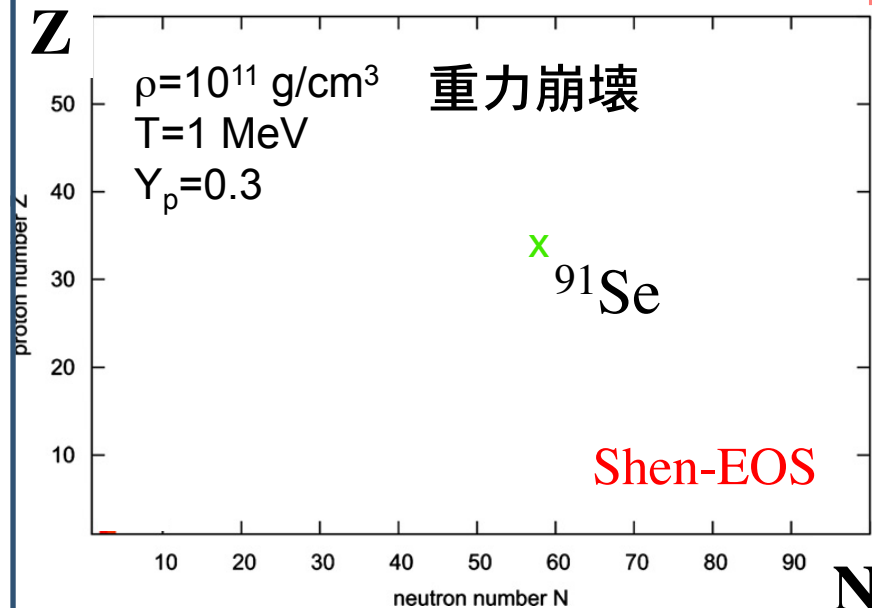
多次元流体ダイナミクス(対流,SASI等)
の中で ν 加熱・冷却



超新星コアにおける原子核組成

Shen-EOS

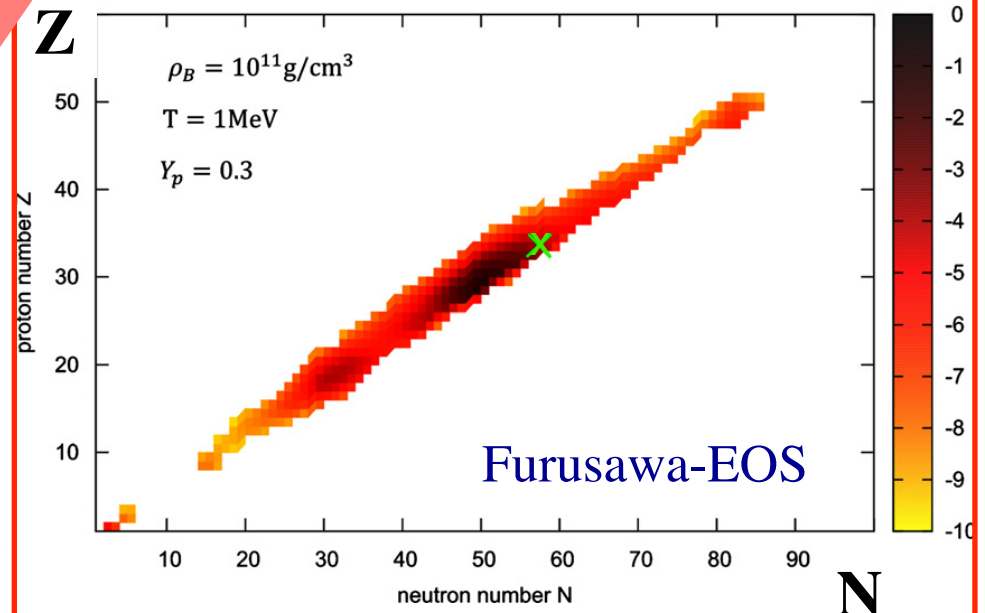
Neutron, proton, ${}^4\text{He}$
One species of nuclei
approximation



代表的な核種1つ

Furusawa-EOS

Neutron, proton, d , t , ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ...
All of nuclei up to $A \sim 1000$
In nuclear statistical equilibrium



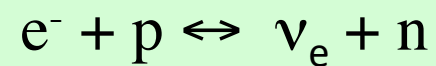
多種多様な核種

超新星でのニュートリノ反応

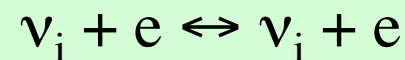
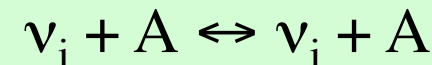
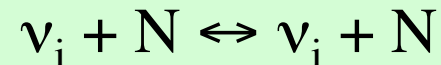
ν 閉込め, 拡散, 放出を担う

ν 個数・エネルギー変化 $\rightarrow$ 物質の加熱冷却

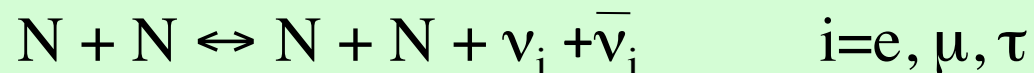
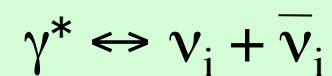
- 放出/吸収:



- 散乱:



- 対生成・消滅:



$$i=e, \mu, \tau$$

反応率は
エネルギー
角度依存

↓
爆発計算に
組み込む

ニュートリノ核反応データの整備が重要: Bruenn, Burrows, Reddy

超新星爆発でのニュートリノの役割

重力崩壊時: ニュートリノ生成・閉込め

- 電子捕獲反応: 縮退電子を吸収・ ν 放出

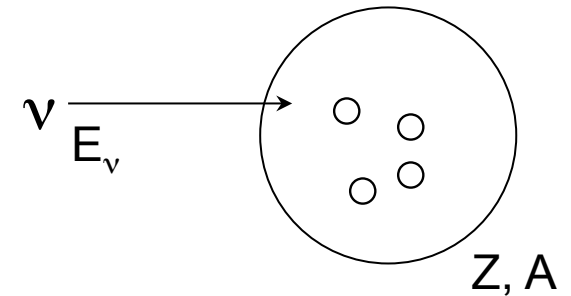
$$\mu_e = 11 \text{ MeV} \left(\frac{\rho Y_e}{10^{10} \text{ g/cm}^3} \right)^{1/3}$$

$$E_\nu = 10 \sim 100 \text{ MeV}$$

- ニュートリノ 原子核散乱: $\sigma_{\nu A} \propto A^2 \sigma_{\nu N}$
coherent: neutrino wave length $\sim 20 \text{ fm}$, $E_\nu = 10 \text{ MeV}$

* ν -mean free path (λ_ν)

$$\lambda_\nu = \frac{1}{\sigma_{\nu A} n_A}$$



- * Diffusion time scale vs Dynamical time scale

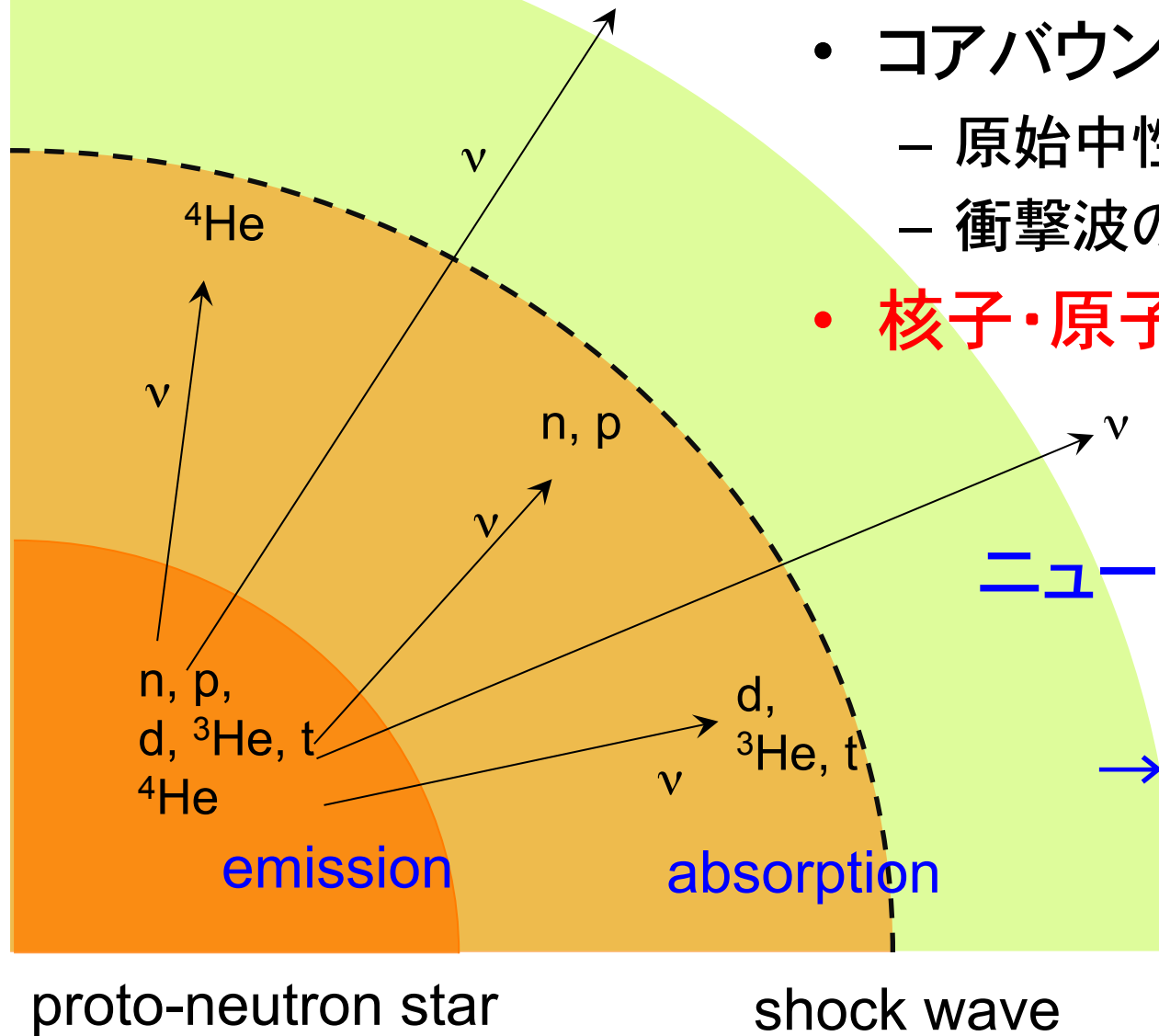
$$\tau_{\text{diffusion}} = \frac{3R_{\text{core}}^2}{c\lambda_\nu} = 2 \times 10^{-2} \text{ sec} \quad \tau_{\text{dyn}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} = 1 \times 10^{-2} \text{ sec} \quad @ 1 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$$

$\rho \geq 10^{11} \text{ g/cm}^3$ では $\tau_{\text{dyn}} \leq \tau_{\text{diffusion}}$ $\rightarrow \nu$ の閉じ込め

バウンス後: ニュートリノが徐々に放出される

- ν の反応率 $\rightarrow$ 物質にエネルギーを与えて、爆発を助ける
(吸収・非弾性) $\rightarrow \nu$ 加熱メカニズム

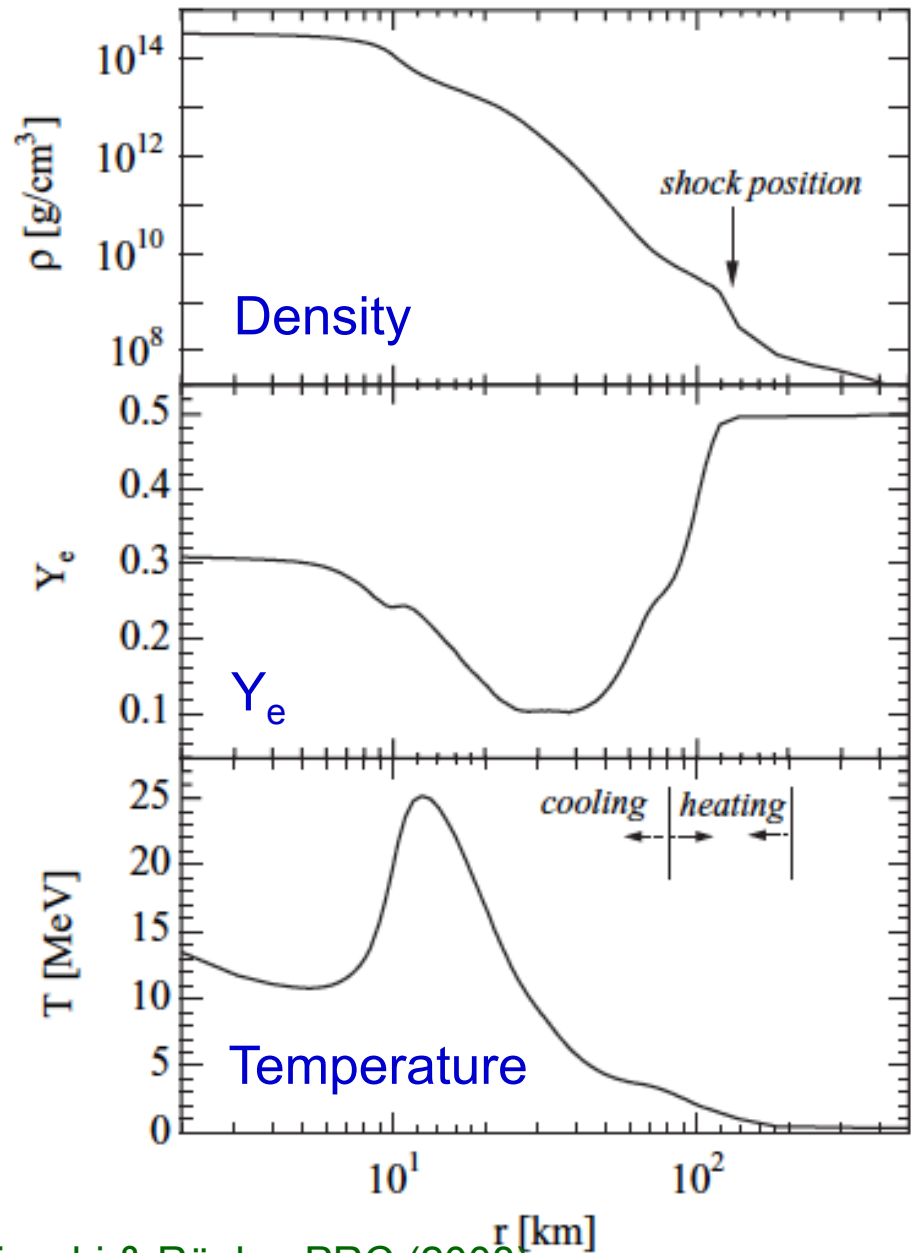
ニュートリノ加熱と状態方程式：組成



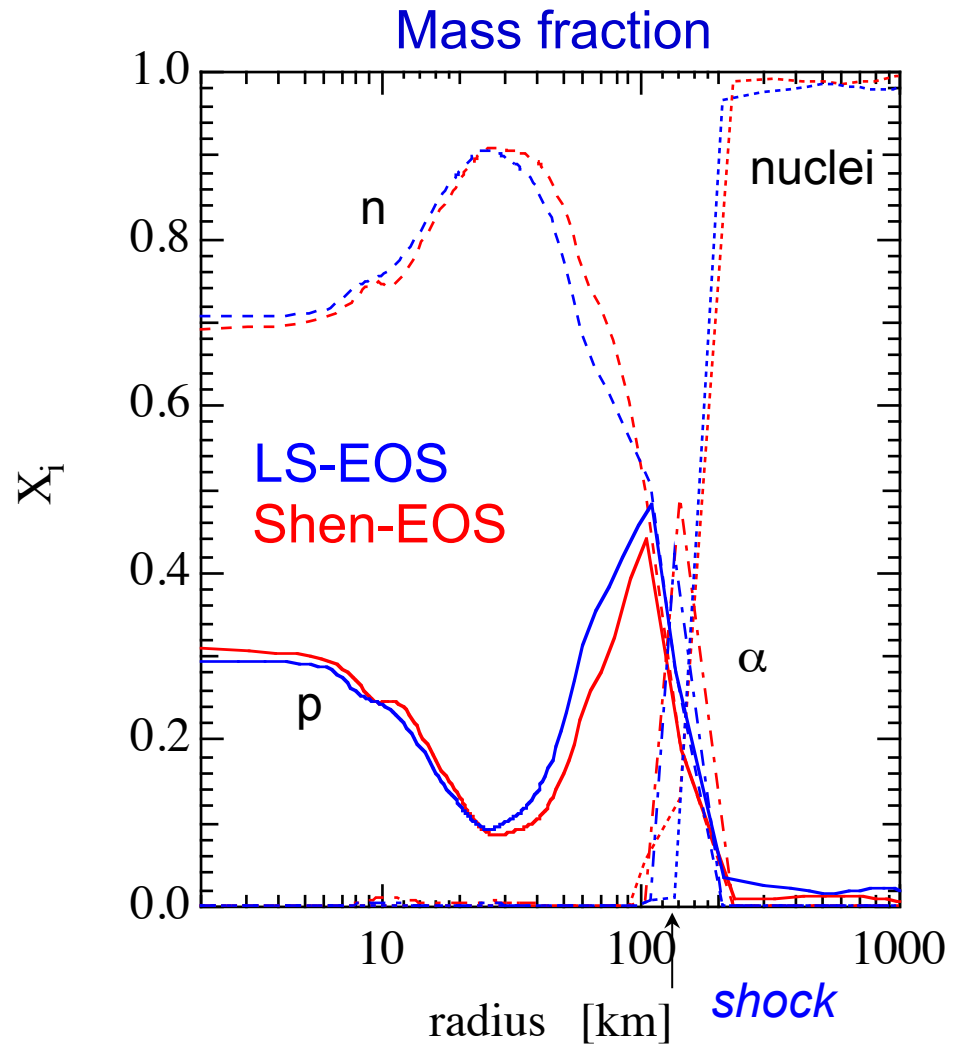
- コアバウンス後において
 - 原始中性子星の表面
 - 衝撃波の背面
- 核子・原子核の組成は？

ニュートリノ放出・吸収
→ 冷却/加熱
→ 爆発メカニズム

Hot dense matter after core bounce

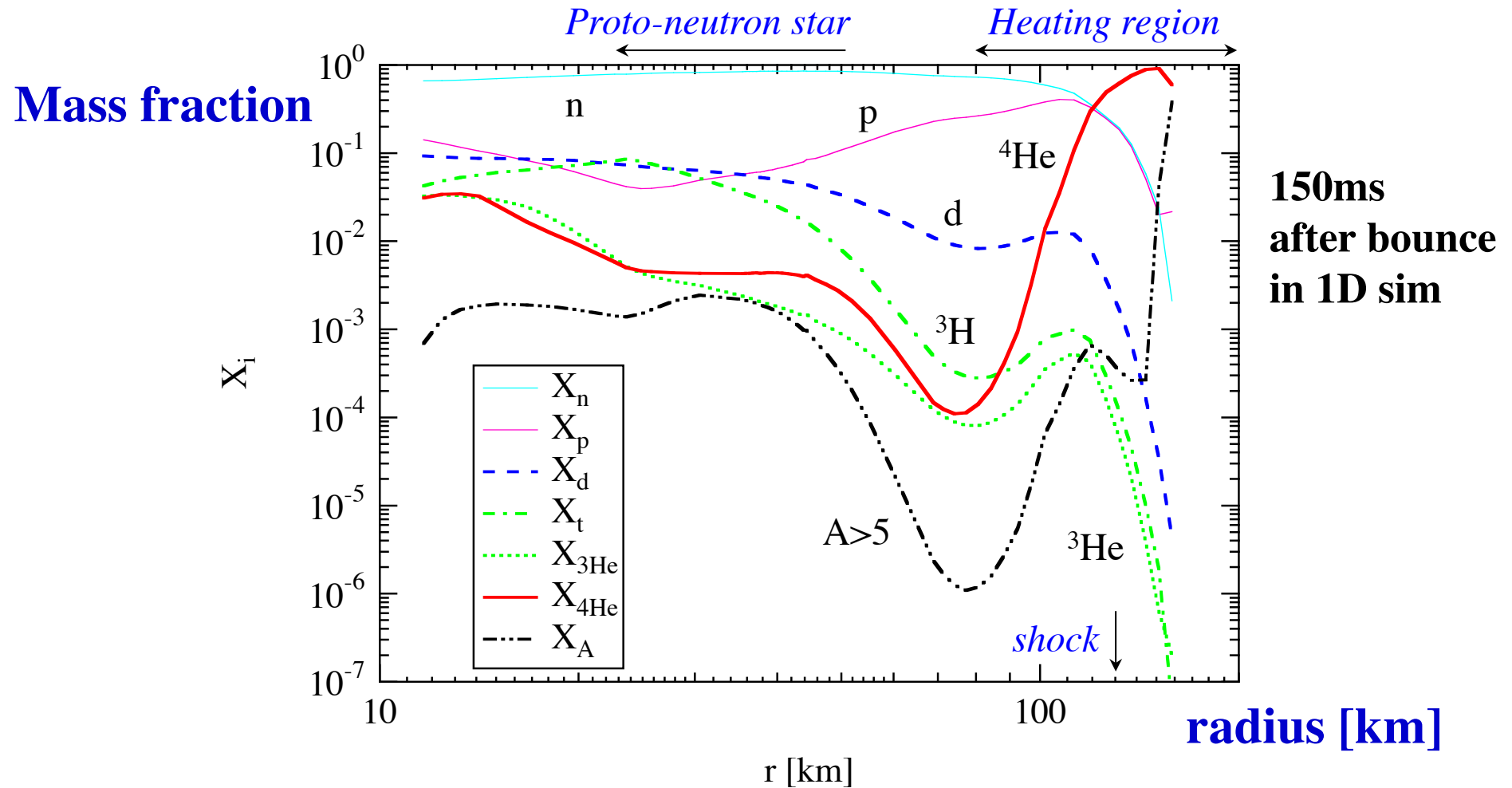


At $t_{\text{pb}} = 150 \text{ ms}$ after bounce



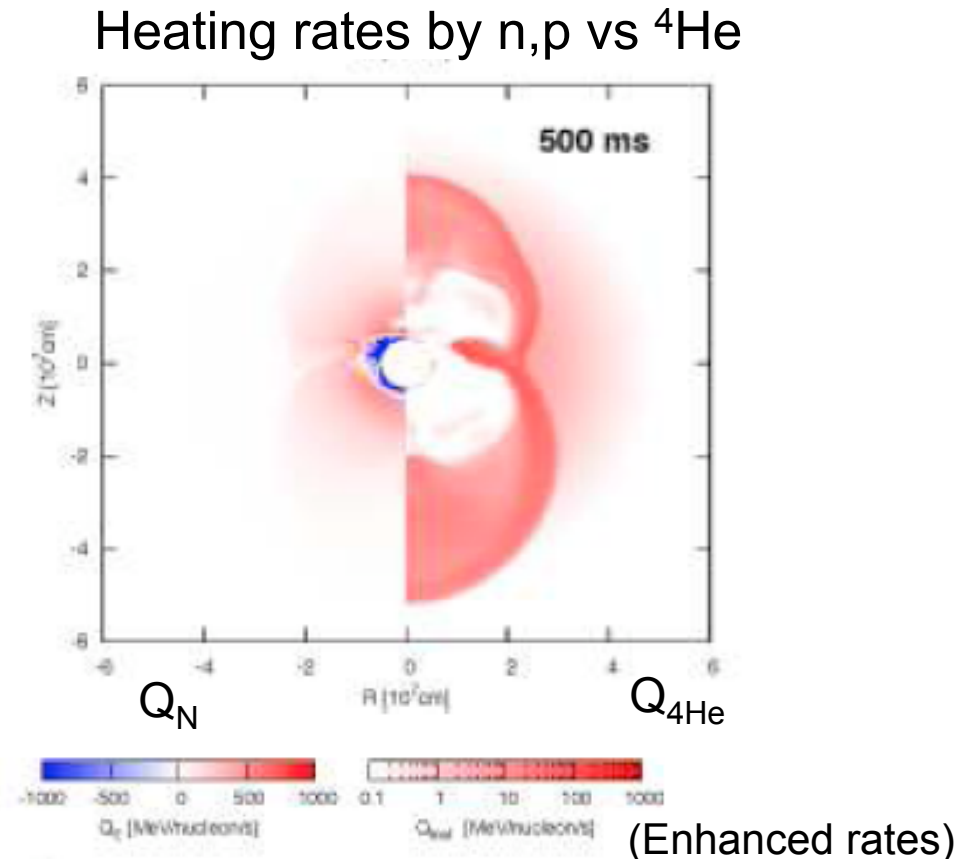
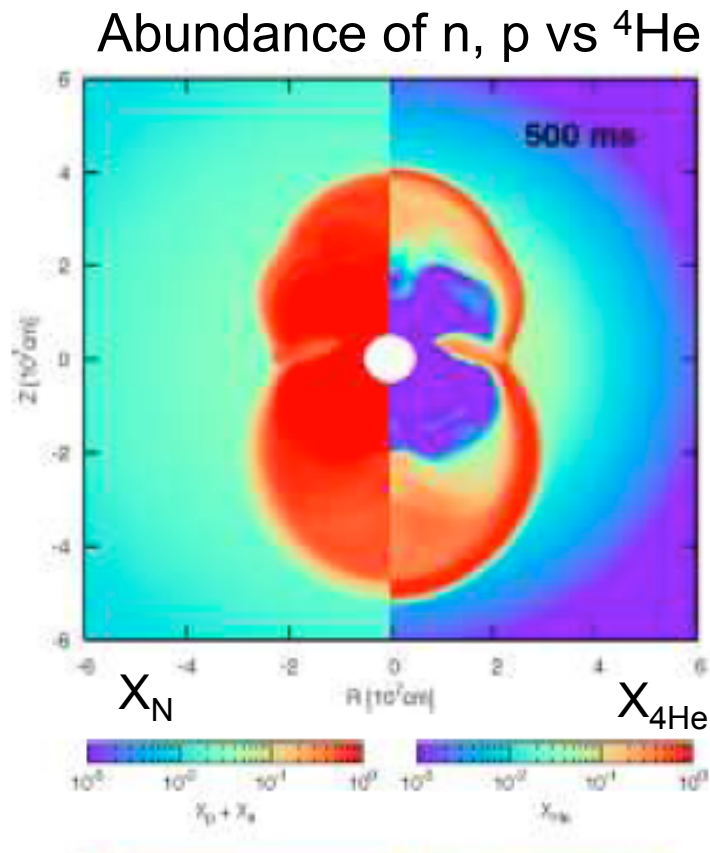
超新星コアには様々な軽元素が出現する

- d , ${}^3\text{H}$, ${}^4\text{He}$ in cooling / heating region



ν -heating mechanism: ^4He in supernova core

- Inelastic ν - ^4He scattering might help the shock revival Haxton PRC ('88)
- Shock revival IF ν - ^4He rates is 3-10 times larger & $\delta v/v$ Ohnishi ApJ ('07)



- fraction of other clusters ??

ν -重陽子反応:ニュートリノ加熱への寄与

Nakamura, Sumiyoshi and Sato PRC (2009)

- Application of neutrino-deuteron reactions

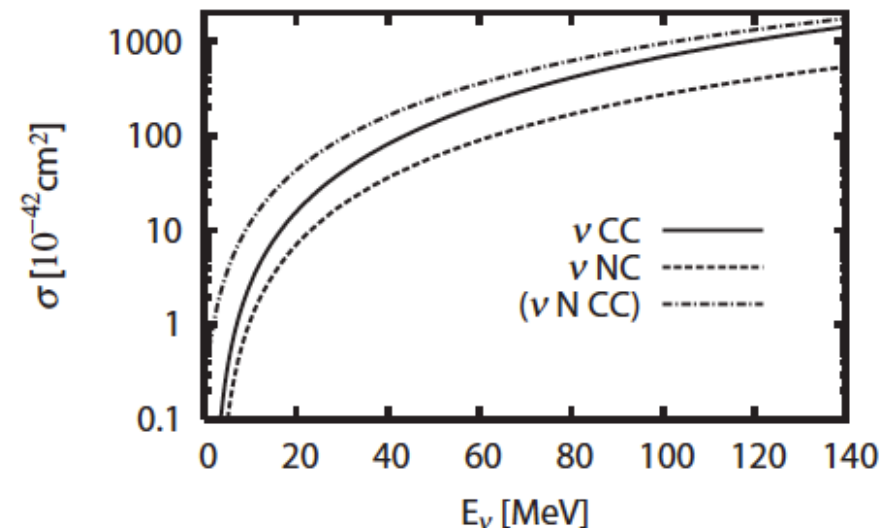
$$\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p \quad [\nu \text{ CC}]$$

$$\bar{\nu}_e + d \rightarrow e^+ + n + n \quad [\bar{\nu} \text{ CC}]$$

$$\nu + d \rightarrow \nu + p + n \quad [\nu \text{ NC}]$$

$$\bar{\nu} + d \rightarrow \bar{\nu} + p + n \quad [\bar{\nu} \text{ NC}]$$

$$\nu/\bar{\nu} + d \rightarrow \nu/\bar{\nu} + d \quad [\nu/\bar{\nu} \text{ scatt}].$$



- Average energy transfer from neutrino to matter

$$\langle \sigma \omega \rangle_{T_\nu} = \int dE_\nu f(T_\nu, E_\nu) \sigma \omega(E_\nu). \quad f(T_\nu, E_\nu) = \frac{N}{T_\nu^3} \frac{E_\nu^2}{e^{E_\nu/T_\nu} + 1}.$$

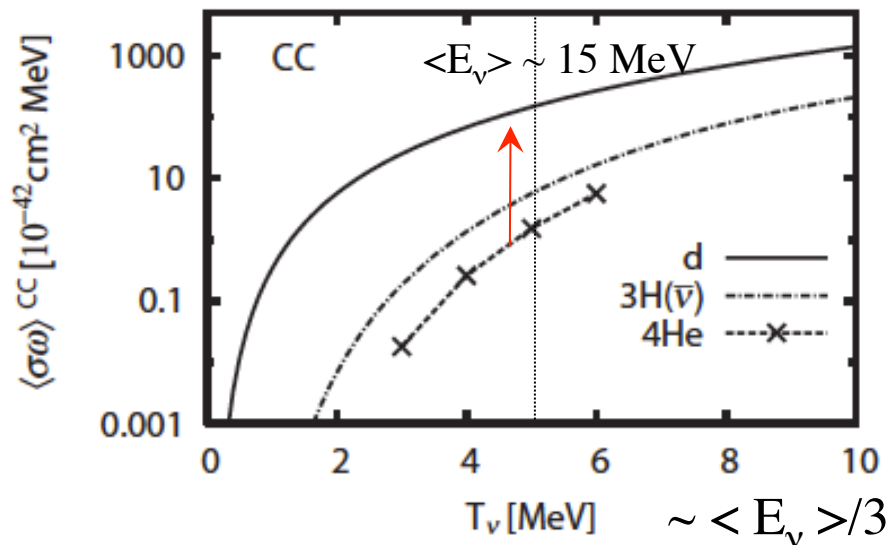
cf. $\begin{array}{l} \nu + {}^3\text{H}, {}^3\text{He} \\ \nu + {}^4\text{He} \end{array} \rightarrow \text{breakup}$

ニュートリノ加熱率の評価

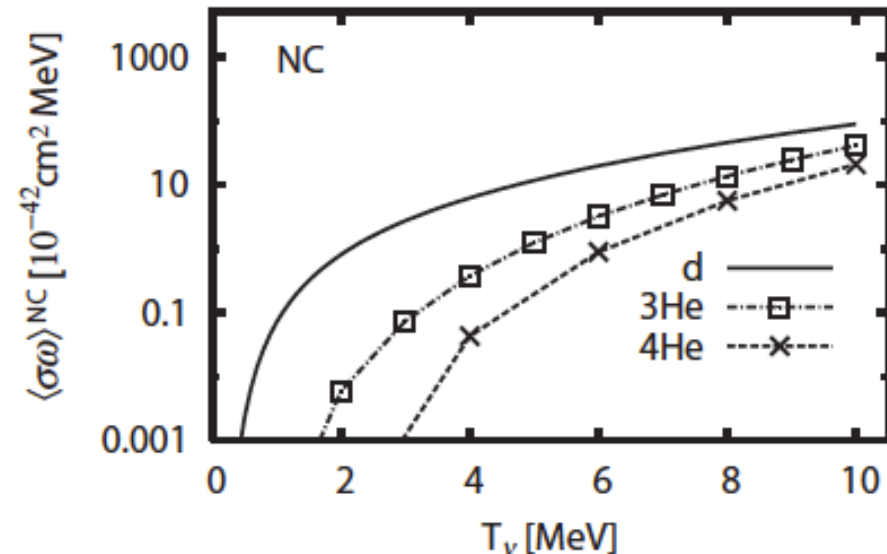
- Nucleon $Q_v^N \approx 223 \cdot \frac{L_{\nu,52} E_{\nu,15}^2}{R_7^2} X_i \left[\frac{\text{MeV}}{s \cdot N} \right]$
- Nuclei $Q_v^A \approx 32 \cdot \frac{L_{\nu,52}}{R_7^2 E_{\nu,15}} X_i \overline{\langle \sigma E \rangle}_{\nu-A} \left[\frac{\text{MeV}}{s \cdot N} \right]$ Haxton PRL ('88)

Average energy transfer x cross section $\overline{\langle \sigma E \rangle}_{\nu-A} [10^{-40} \text{MeVcm}^2]$

- 加熱率: ν -deuteron $>$ ν - ^3He , $t >$ ν - ^4He dが沢山いれば効く



Nakamura, Sumiyoshi & Sato PRC (2009)



O'Connor et al. PRC (2007)

超新星爆発メカニズムの解明

- 核物理と ν 輻射流体計算の組み合わせ
 - 2D/3D: 爆発するモデル、未確定、核物理？
 - ν 輻射流体計算で、3D爆発メカニズム解明へ
 - 3D ν 輻射輸送で超新星ニュートリノ異方性予測
- 核物理データは多次元計算でも重要である
 - ニュートリノ軽元素反応の影響
 - ニュートリノ・原子核データは未だ足りない

HPCI戦略P分野5「物質と宇宙の起源と構造」課題3



Core-collapse supernovae is one of the target simulations on K-computer