

E02 超新星ニュートリノと核物理・宇宙化学進化の理論研究

2020.6.2 @地下宇宙領域研究会
東京理科大 理工 鈴木英之

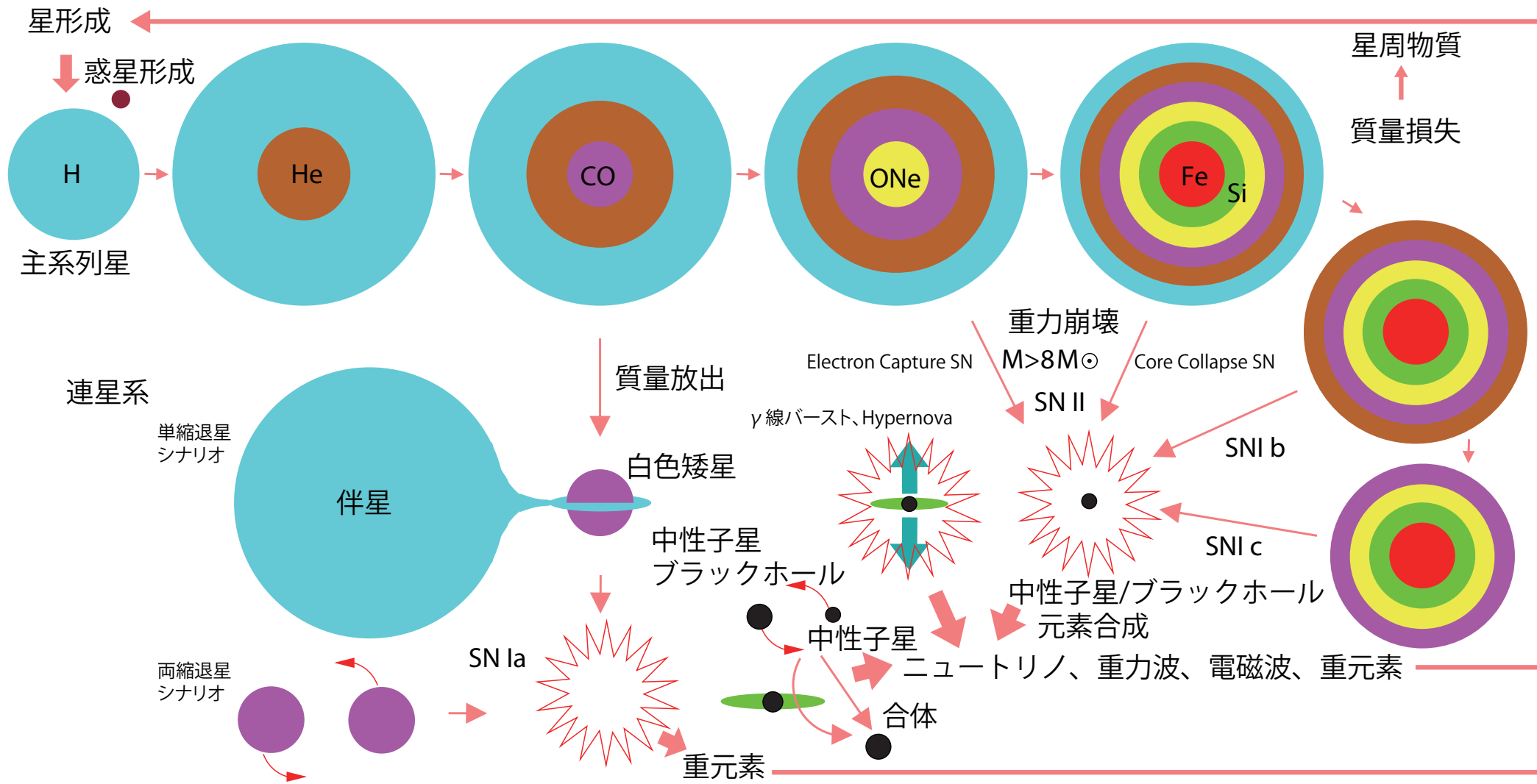
研究組織

研究代表者 鈴木英之（東京理科大学・全体の統括）
研究分担者 山田章一（早稲田大学・超新星爆発シミュレーション）
鷹野正利（早稲田大学・核物理）
中里健一郎（九州大学・超新星（背景）ニュートリノ）
辻本拓司（国立天文台・化学進化）
PD 岩上わかな（早稲田大学・超新星爆発シミュレーション）
研究協力者 富樫甫（九州大学・核物理）

公募研究

吉田 敬: 大質量星における ^{40}K と中質量元素の元素合成：後期進化の対流混合による影響
中村 航: 現実的な3次元超新星モデルに基づく超新星背景ニュートリノ解析
加藤 ちなみ: ニュートリノ集団振動を考慮した超新星ニュートリノスペクトルの構築

- 超新星（背景）ニュートリノの理論モデルの深化
多次元ニュートリノ輸送を含む超新星シミュレーションと原始中性子星冷却シミュレーションによる超新星ニュートリノに関する研究とシミュレーションに必要な状態方程式と高密度物質中でのニュートリノ反応率に関する研究
- 星形成・元素合成史（化学進化）と超新星背景ニュートリノ、地球ニュートリノをつなぐ総合的な研究への発展

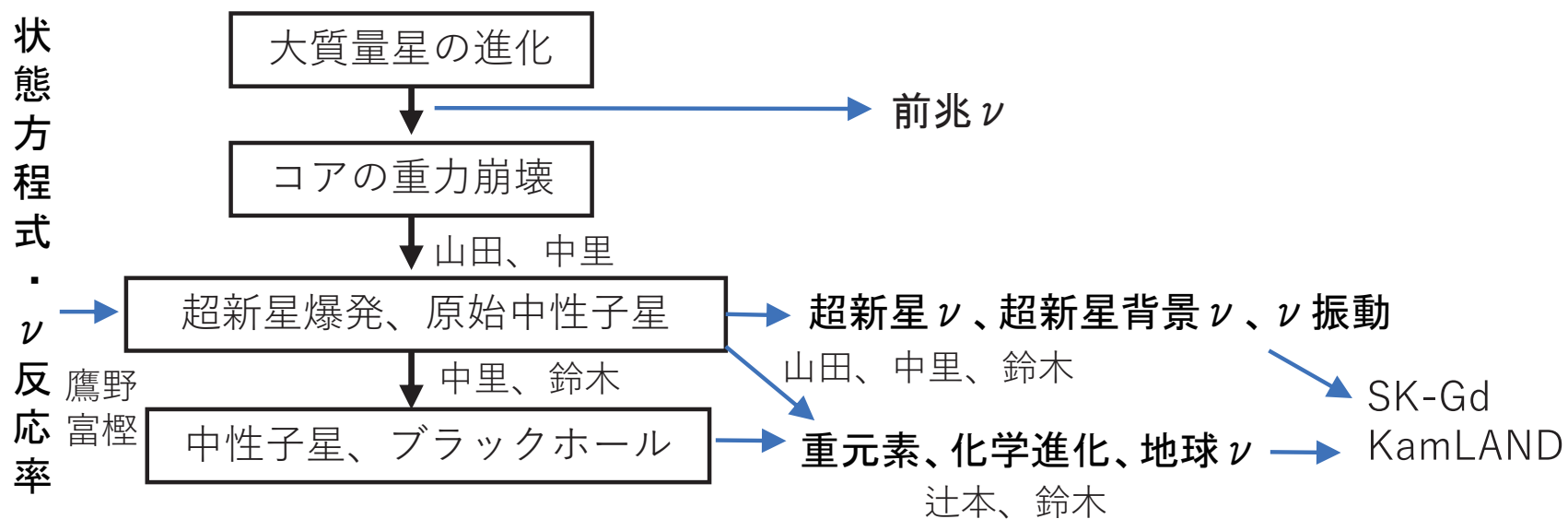


重い星の重力崩壊 ⇒ 中性子星 NS, ブラックホール BH, 超新星 SN ν , 重元素
 中性子星合体 ⇒ 重力波、short GRB、kilonova、重元素 (r 過程) ⇒ 地球 ν
 Ia 型超新星 ⇒ 重元素 (鉄まで)

星形成率 SFR、初期質量関数 IMF、恒星・連星系進化、爆発・合体・元素合成
 金属 (重元素) 量 (化学進化)、超新星背景ニュートリノ、地球ニュートリノ

研究テーマ

- 重い星の重力崩壊による超新星爆発、ブラックホール形成イベントの理論研究と放出されるニュートリノの数値シミュレーション
- 原始中性子星の冷却段階に放出されるニュートリノの系統的な研究
- これらに大きな影響を及ぼす高密度物質の状態方程式とニュートリノ反応率の系統的な研究 (核子制動放射、modified URCA など)
- 星形成史、化学進化、星形成時の初期質量分布のモデルと組み合わせた超新星背景ニュートリノの観測予測計算
- 超新星背景ニュートリノの計算と宇宙化学進化モデルの整合性検討
- 天の川銀河の化学進化モデル (場所依存、r 過程を含む) と地球ニュートリノ



成果

- Milad Delfan Azari, Shoichi Yamada, Taiki Morinaga, Hiroki Nagakura, Shun Furusawa, Akira Harada, Hirotada Okawa, Wakana Iwakami, Kohsuke Sumiyoshi, Fast collective neutrino oscillations inside the neutrino sphere in core-collapse supernovae, *Phys. Rev. D* 101, 023018 (2020) DOI: 10.1103/PhysRevD.101.023018
- Jinniu Hu, Shishao Bao, Ying Zhang, Ken'ichiro Nakazato, Kohsuke Sumiyoshi, Hong Shen, Effects of symmetry energy on the radius and tidal deformability of neutron stars in relativistic mean-field model, arXiv:2002.00562, *Prog. Theor. Exp. Phys*
- Kohsuke Sumiyoshi, Ken'ichiro Nakazato, Hideyuki Suzuki, Jinniu Hu, Hong Shen, Influence of density dependence of symmetry energy in hot and dense matter for supernova simulations, *Astrophys. J.* 887 (2019) 110 DOI: 10.3847/1538-4357/ab5443
- Ken'ichiro Nakazato, Hideyuki Suzuki, A New Approach to Mass and Radius of Neutron Stars with Supernova Neutrinos, *Astrophys.J.*891:156,2020 DOI: 10.3847/1538-4357/ab7456
- Wakana Iwakami, Hirotada Okawa, Hiroki Nagakura, Akira Harada, Shun Furusawa, Kosuke Sumiyoshi, Hideo Matsufuru, Shoichi Yamada, Simulations of the Early Post-Bounce Phase of Core-Collapse Supernovae in Three-Dimensional Space with Full Boltzmann Neutrino Transport, arXiv:2004.02091
- Shun Furusawa, Hajime Togashi, Kohsuke Sumiyoshi, Koichi Saito, Shoichi Yamada, Hideyuki Suzuki, Nuclear statistical equilibrium equation of state with a parametrized DiracBrckner HartreeFock calculation, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Volume 2020, Issue 1, January 2020, 013D05, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptz135>

3D ニュートリノ輸送コード+2D 流体計算の応用 (山田)

Electron Lepton Number crossing \Rightarrow Fast Flavor Conversion

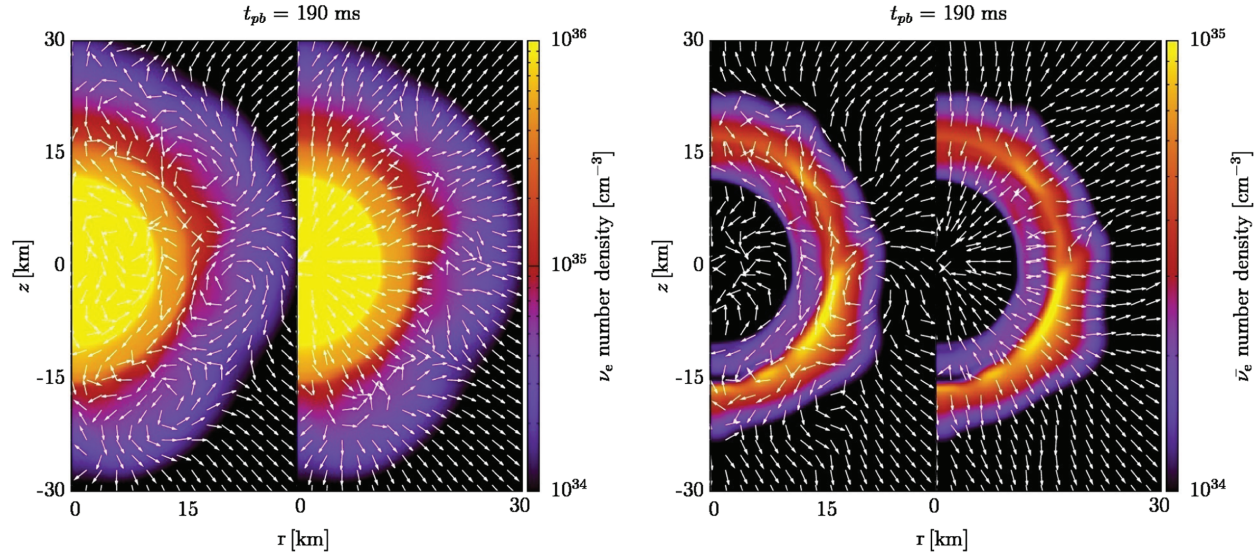


FIG. 6. The number fluxes (arrows) and color contours of the number densities of ν_e (left two panels) and $\bar{\nu}_e$ (right two panels), respectively. The left and right halves of each panel are for the laboratory and fluid-rest frames, respectively.

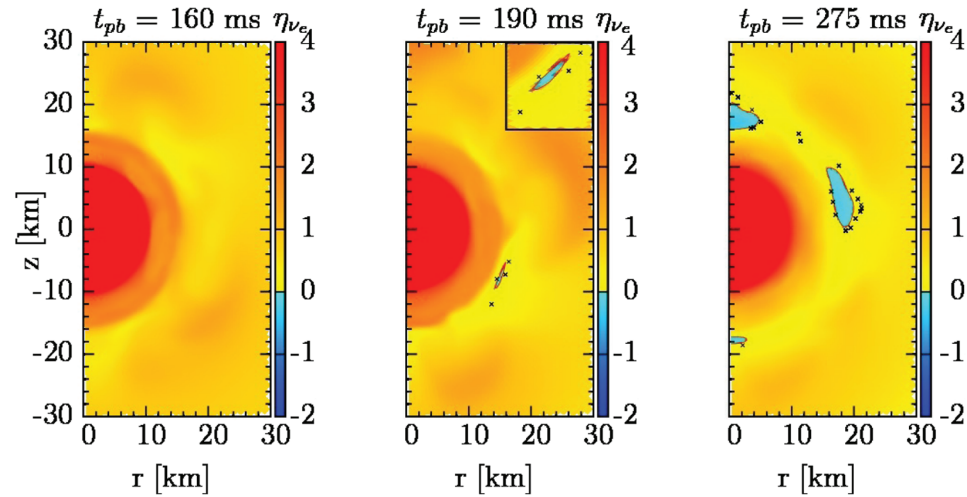


FIG. 7. The color contour plots of $\eta_{\nu_e} = \mu_{\nu_e}/T$ at different times. Blue regions indicate the places, where η_{ν_e} is slightly smaller than 0 and the contour line indicates the points, at which $\eta_{\nu_e} = 0$. The crosses show the points of ELN crossings.

空間3次元 + 運動量空間3次元のボルツマンハイドロコードを用いた重力崩壊型超新星のニュートリノ輻射流体シミュレーション (岩上、山田)

$$N_r \times N_\theta \times N_\phi \times N_\varepsilon \times N_{\theta_\nu} \times N_{\phi_\nu} = 256 \times 48 \times 96 \times 16 \times 6 \times 6$$

流体の物理量

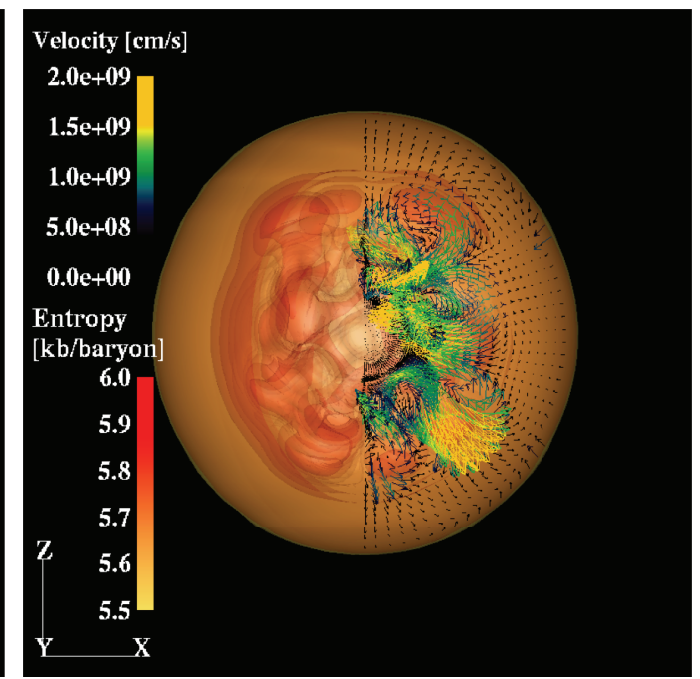
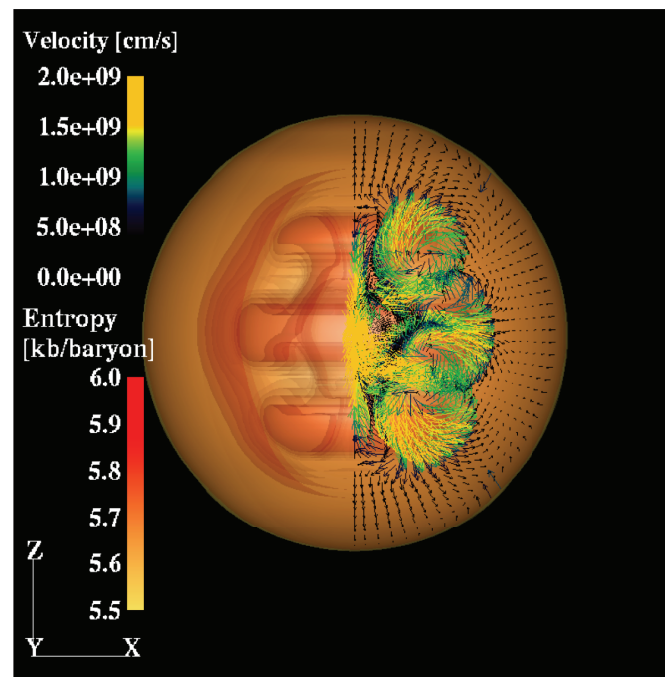
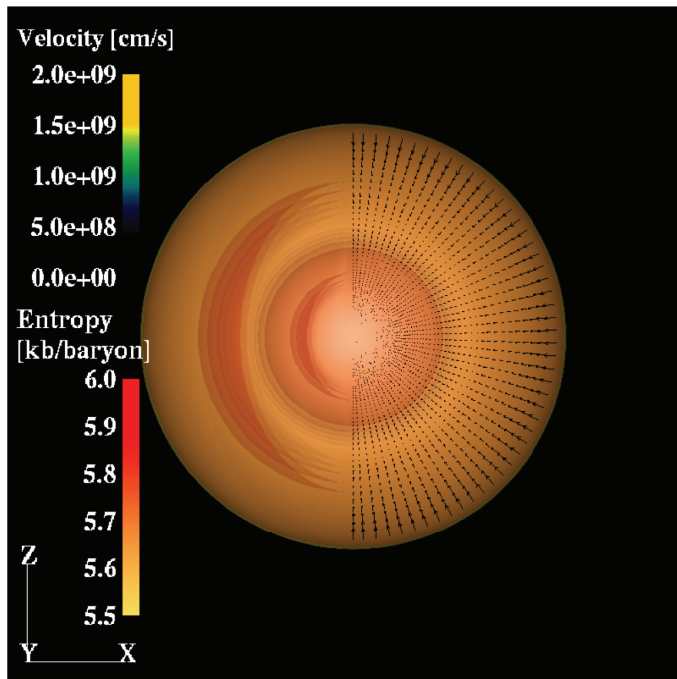
エントロピーの等値面と速度ベクトル

衝撃波発生直後に原始中性子星内部で発生する対流の成長とそれがする減衰までを計算 (~20ms)

1D

2D

3D



対流なし

~100km

環状の対流

~100km

セル状の対流

~100km

ニュートリノの物理量

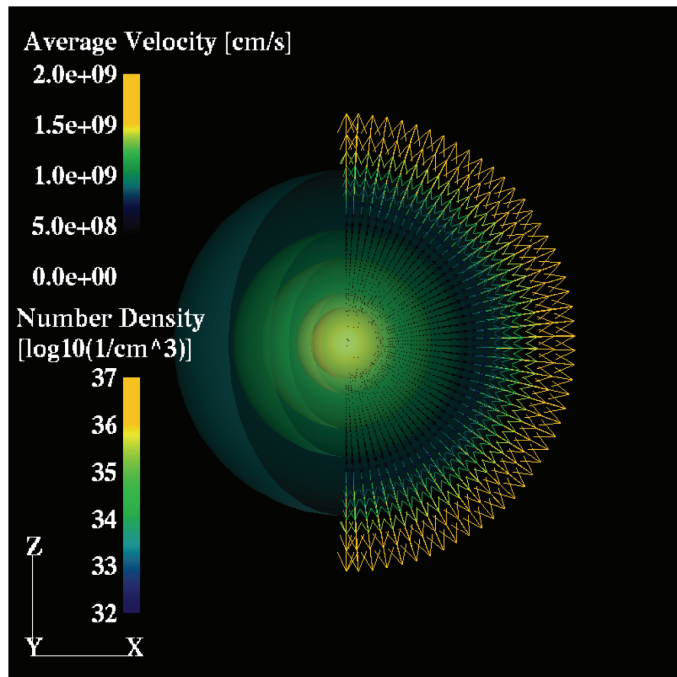
電子ニュートリノの数密度とフラックスファクターベクトル

中心部では流体と同じ速度でニュートリノが移動し、外側でニュートリノが物質から離れて真っ直ぐに飛んでいく

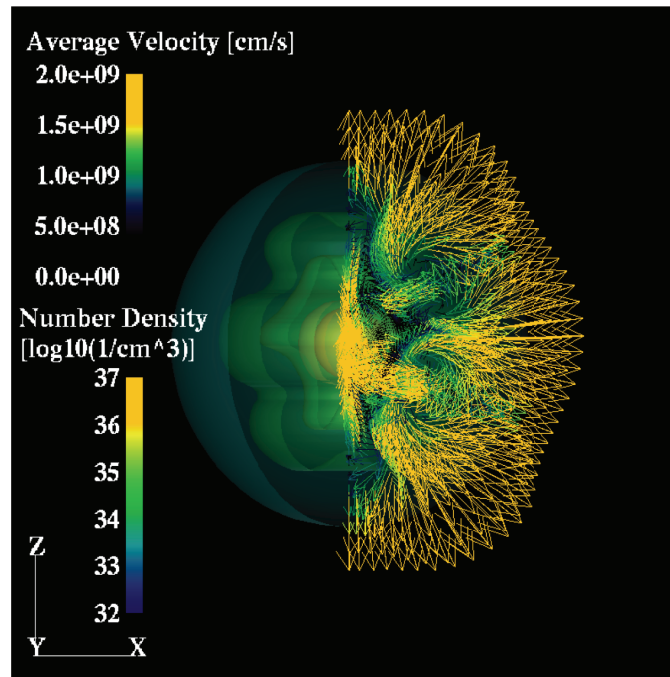
1D

2D

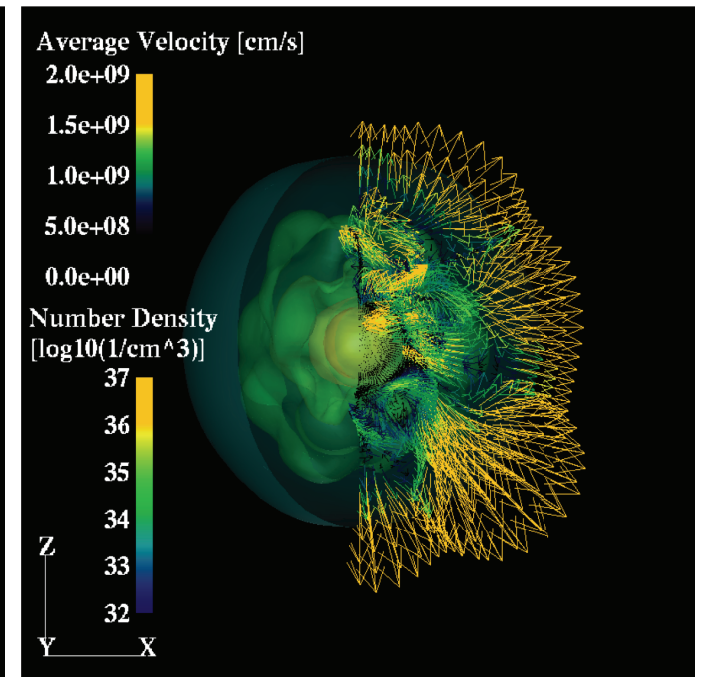
3D



~100km



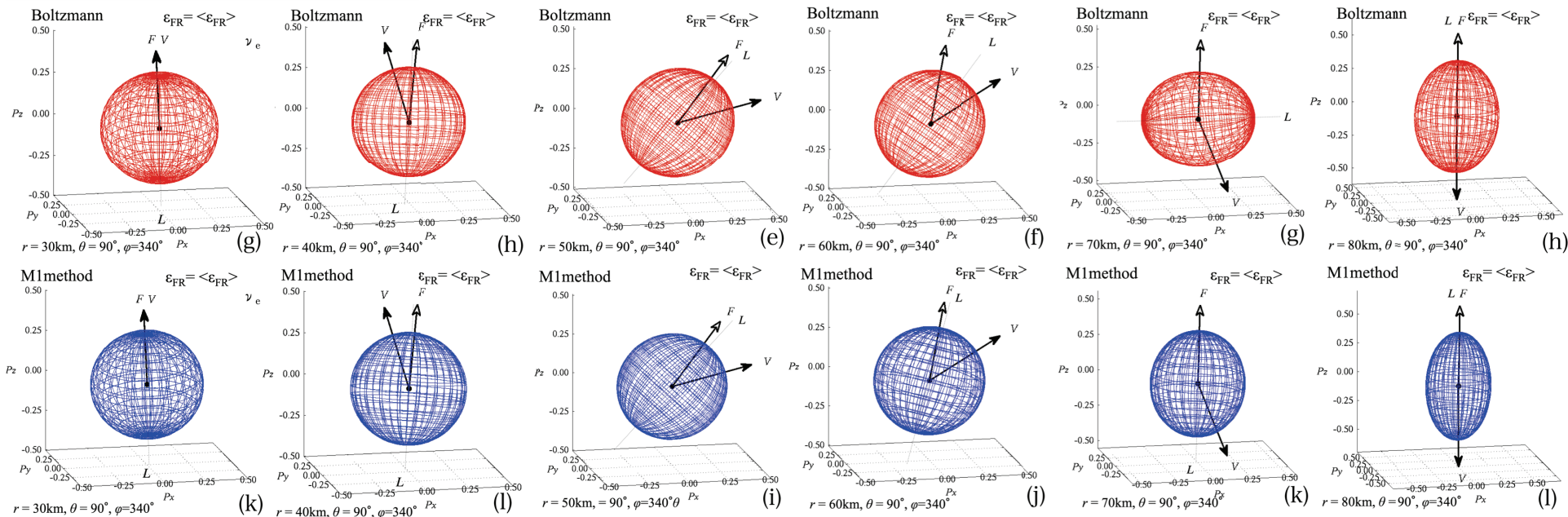
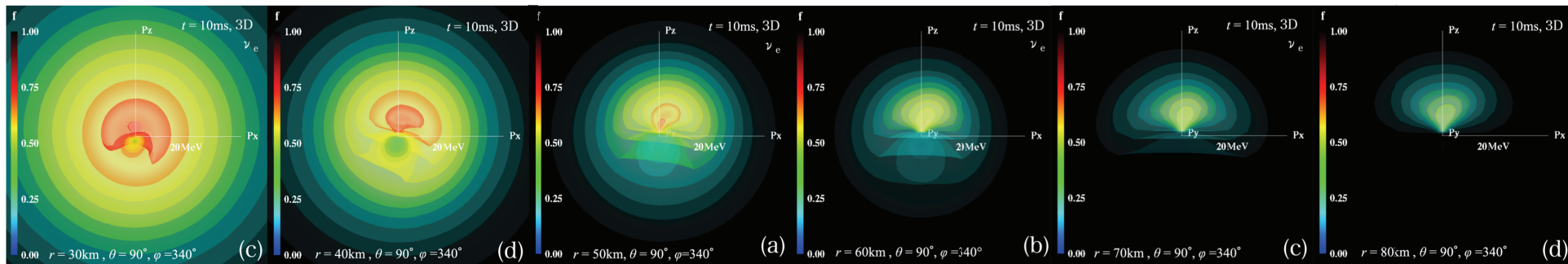
~100km



~100km

3D ボルツマン計算と、M1 closure 近似の比較

運動量空間におけるニュートリノ分布とエディントンテンソルの楕円



等方分布、FとVが一致

FとVがずれる

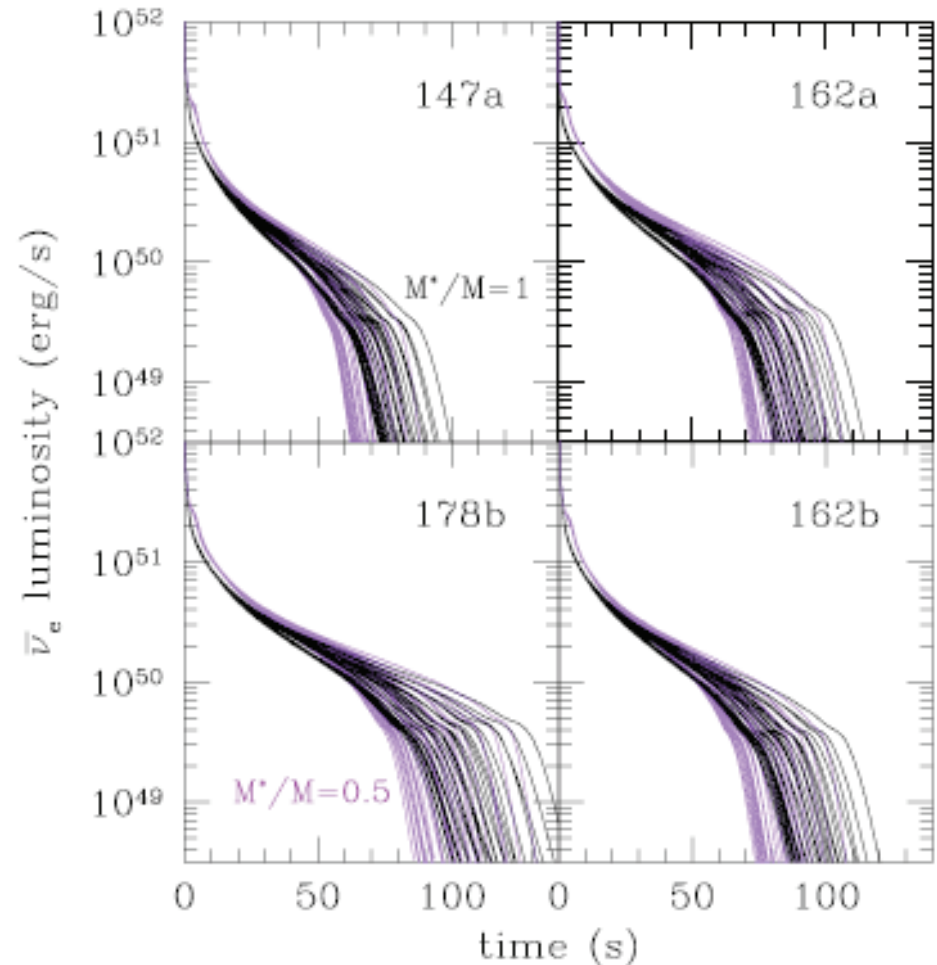
FとLは並行

FとLがずれる

分布が球形から楕円に変形する過程で差が生じる

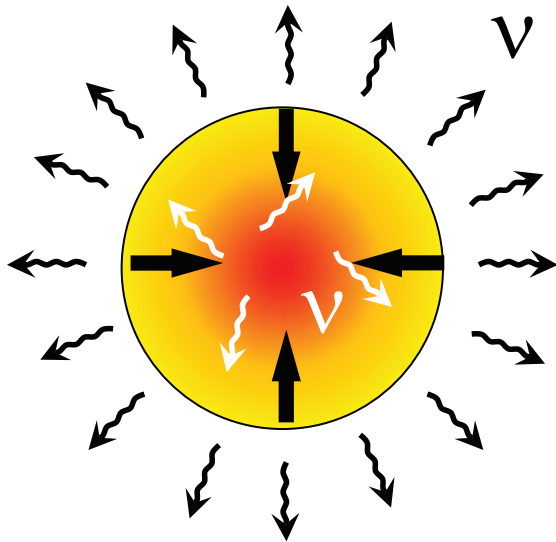
原始中性子星冷却の計算 (中里, 鈴木)

- バリオン質量 $1.47, 1.62, 1.78M_{\odot}$ を持つ原始中性子星モデルを準備。
 - $1.62M_{\odot}$ のモデルは、初期条件の違うものを、2モデルずつ。
- ゼロ温度のエネルギー 30組 × effective mass 3通り、計90通りの状態方程式を作成。
- 全360モデルを計算。

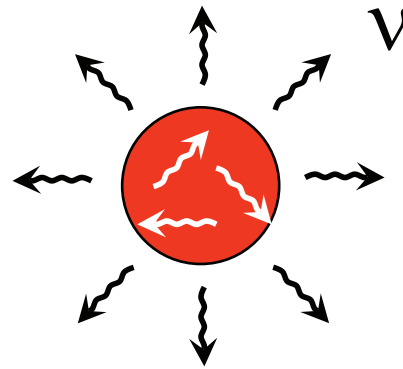


原始中性子星の冷却時間

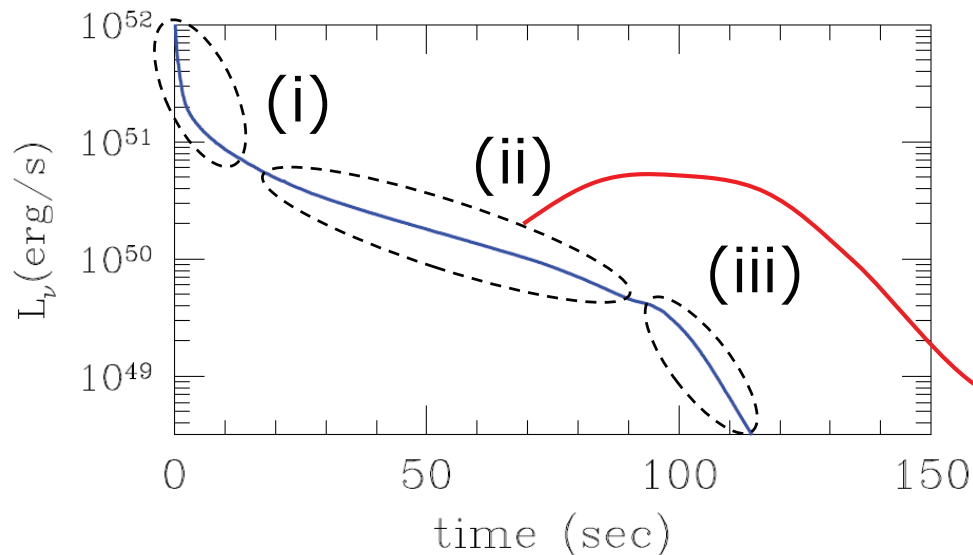
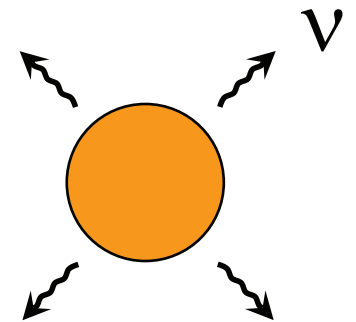
(i) contraction



(ii) shallow decay



(iii) volume cooling



- ニュートリノ光度曲線の **e-folding time** の極大値を各モデルの冷却時間と定義する。

$$L_{\bar{\nu}_e}(t) \sim L_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{cool}}}\right)$$

理論とシミュレーションの比較

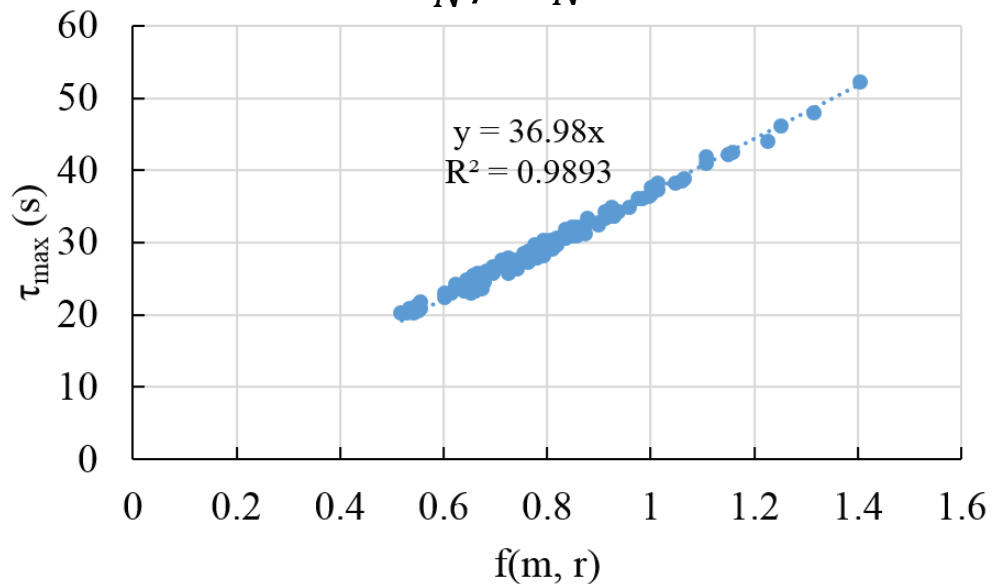
$$\tau_{\text{cool}} = \tau^* \left(\frac{m}{1.4M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{r}{10 \text{ km}} \right)^{-3} \frac{1}{(1-0.5\beta)\sqrt{1-2\beta}}, \quad \beta = \frac{Gm}{rc^2}$$

$$f(m, r) \equiv$$

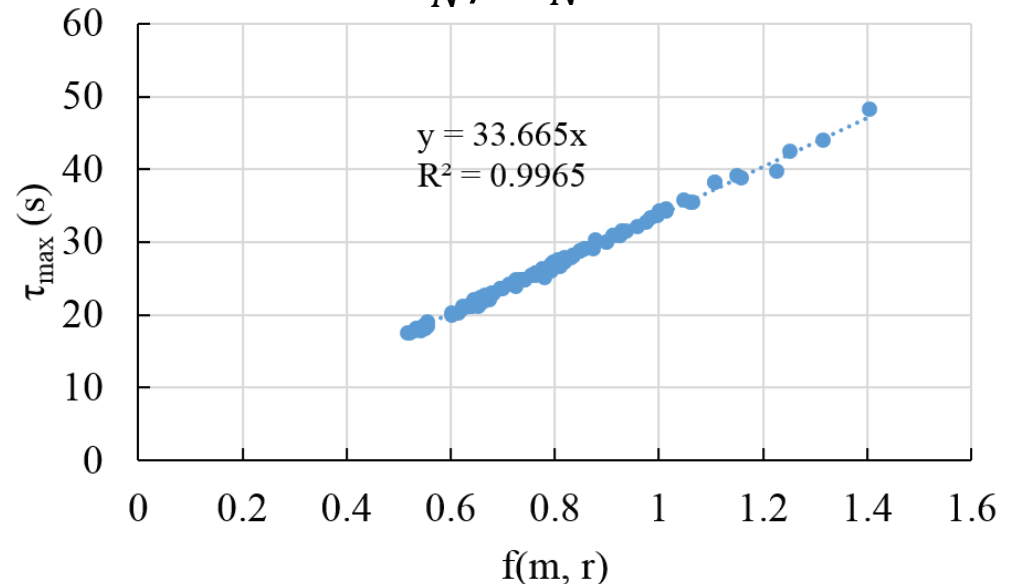
m, r : 中性子星の質量, 半径

- ✓ シミュレーション結果は理論と良く一致する。
- ✓ $33.7 \text{ s} \leq \tau^* \leq 37.0 \text{ s}$ (核物質の比熱の不定性)

$$M_N^*/M_N = 1$$



$$M_N^*/M_N = 0.5$$



中性子星の質量・半径の推定

- ニュートリノによる冷却時間スケール

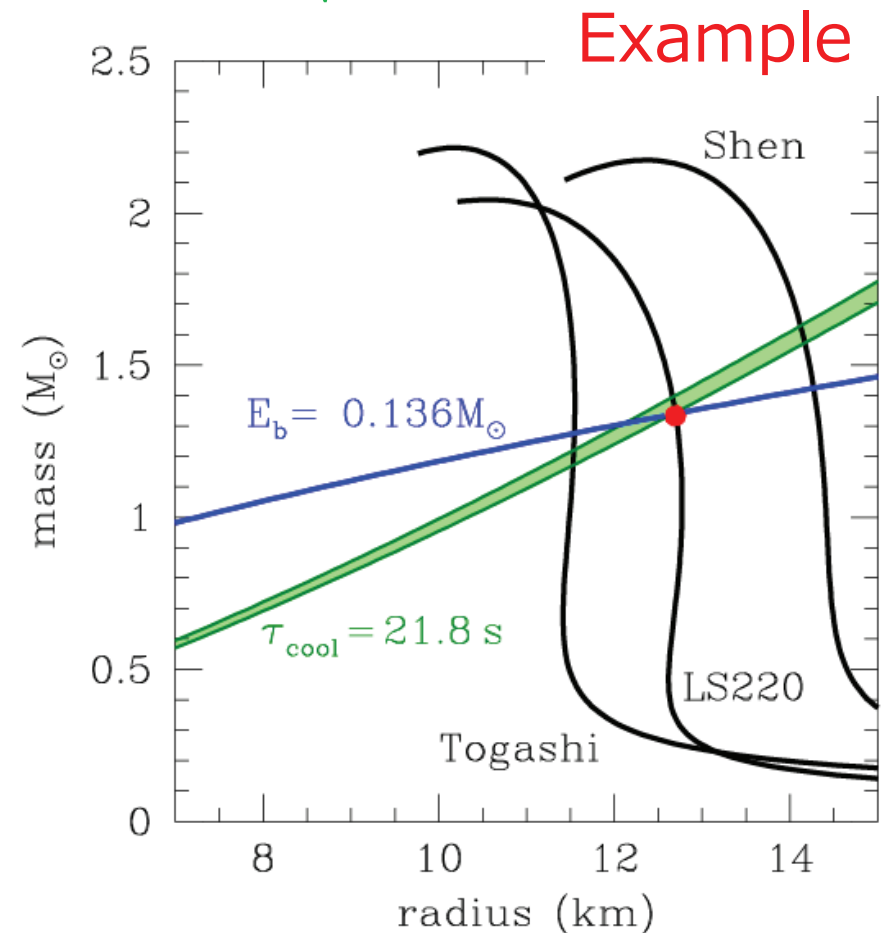
$$\tau_{\text{cool}} = \tau^* \left(\frac{m}{1.4M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{r}{10 \text{ km}} \right)^{-3} \frac{1}{(1-0.5\beta)\sqrt{1-2\beta}}$$

と総放出エネルギー

$$\frac{E_b}{mc^2} = \frac{0.6\beta}{1-0.5\beta} \quad \left(\beta = \frac{Gm}{rc^2} \right)$$

の交点として求まる。

- ニュートリノ観測だけから形成された中性子星の質量と半径を推定できる。



変分法による状態方程式とコンシステントなニュートリノ反応率（鷹野、富樫）

Togashi EOSを用いた 修正URCA過程のニュートリノ放出率計算

$$n + n \rightarrow n + p + e + \bar{\nu}_e$$

$$n + p + e \rightarrow n + n + \nu_e$$

$$Q = \frac{11513}{945} \frac{G^2 (1 + 3c_A^2)}{c^4 \pi \hbar^{13} 2^{10}} m_n^{*3} m_p^* \frac{k_{Fp} k_{Fe}^2}{k_{Fn}^6} R(k_{Fn}) (k_B T)^8$$

$$(1 + 3c_A^2) R(k_{Fn}) = [F_{010}(k_{Fn})]^2 + \frac{27}{2} [F_{T11}(k_{Fn})]^2$$

$$+ c_A^2 \left\{ 3 [F_{001}(k_{Fn})]^2 + \frac{21}{2} [F_{T00}(k_{Fn})]^2 + 27 [F_{T11}(k_{Fn})]^2 \right\}$$

$$F_{sts'}(k) = 4\pi k^3 \int_0^\infty [f_{C1s}^-(r) f_{Cts'}^0(r) - 1] j_0(kr) r^2 dr$$

$$F_{Tst}(k) = 4\pi k^3 \int_0^\infty f_{C1s}^-(r) f_{Tt}^0(r) j_2(kr) r^2 dr$$

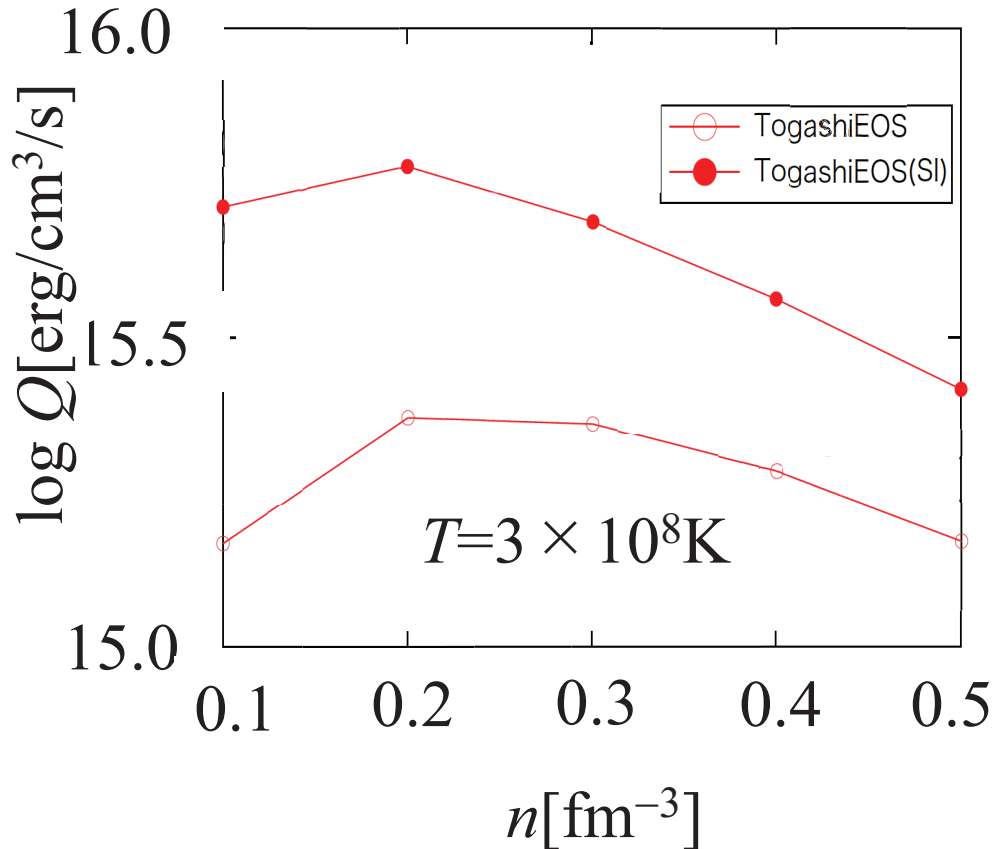
$f_{Cts}^\mu(r)$, $f_{Tt}^\mu(r)$: Togashi EOSで計算された2核子間相関関数

nn相関は中心力相関のみ

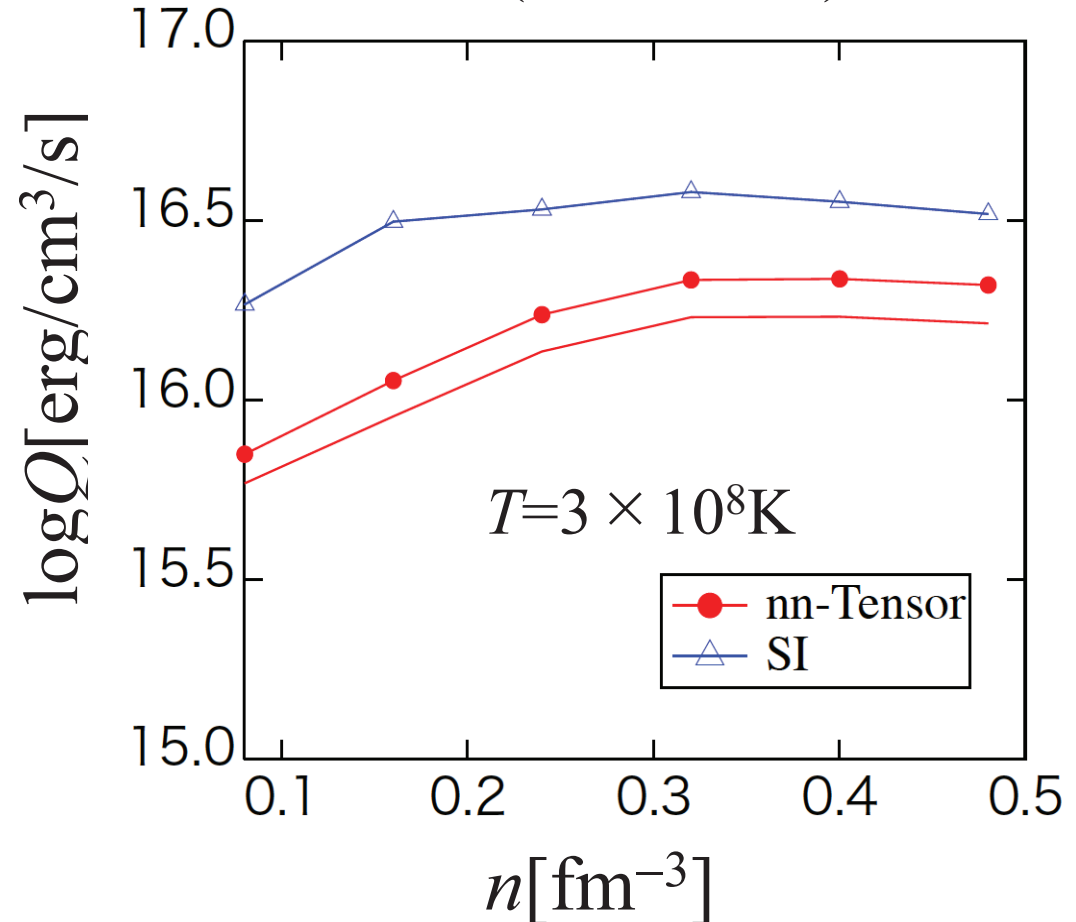
np相関は中心力相関 + テンソル力相関

Togashi EOSを用いた修正URCA過程ニュートリノ放射率

Togashi EOS



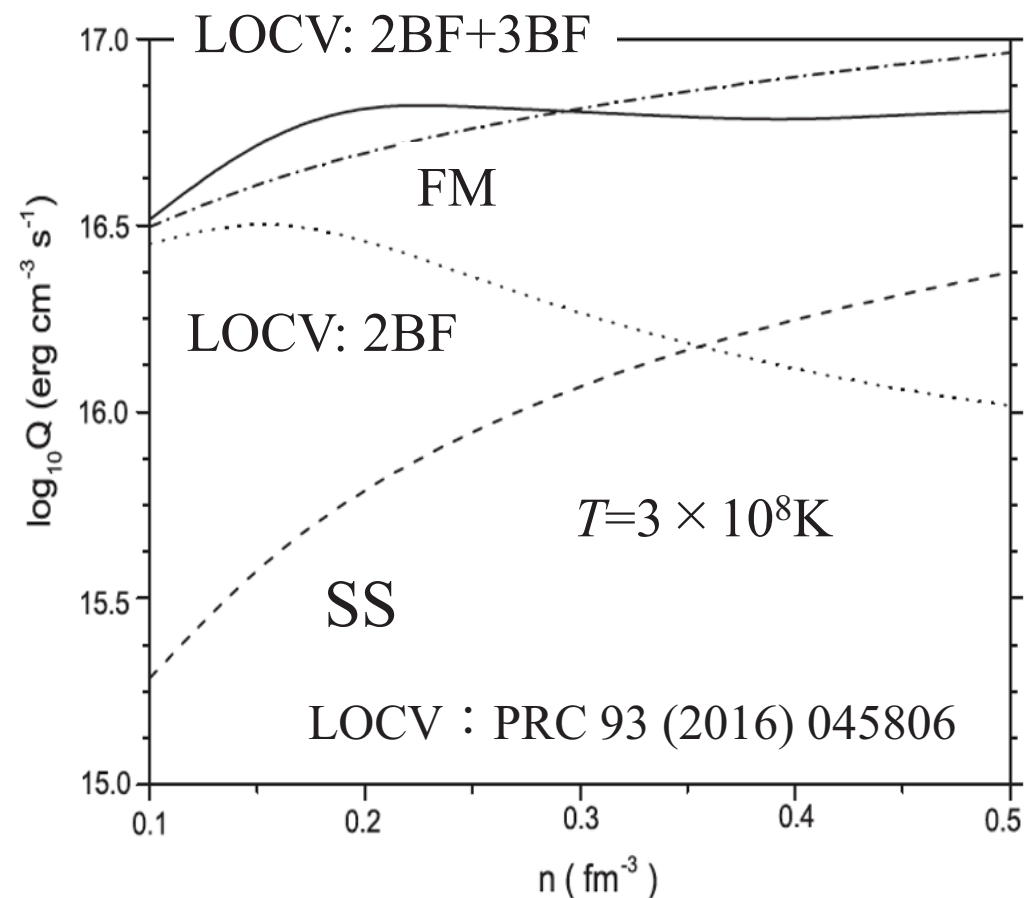
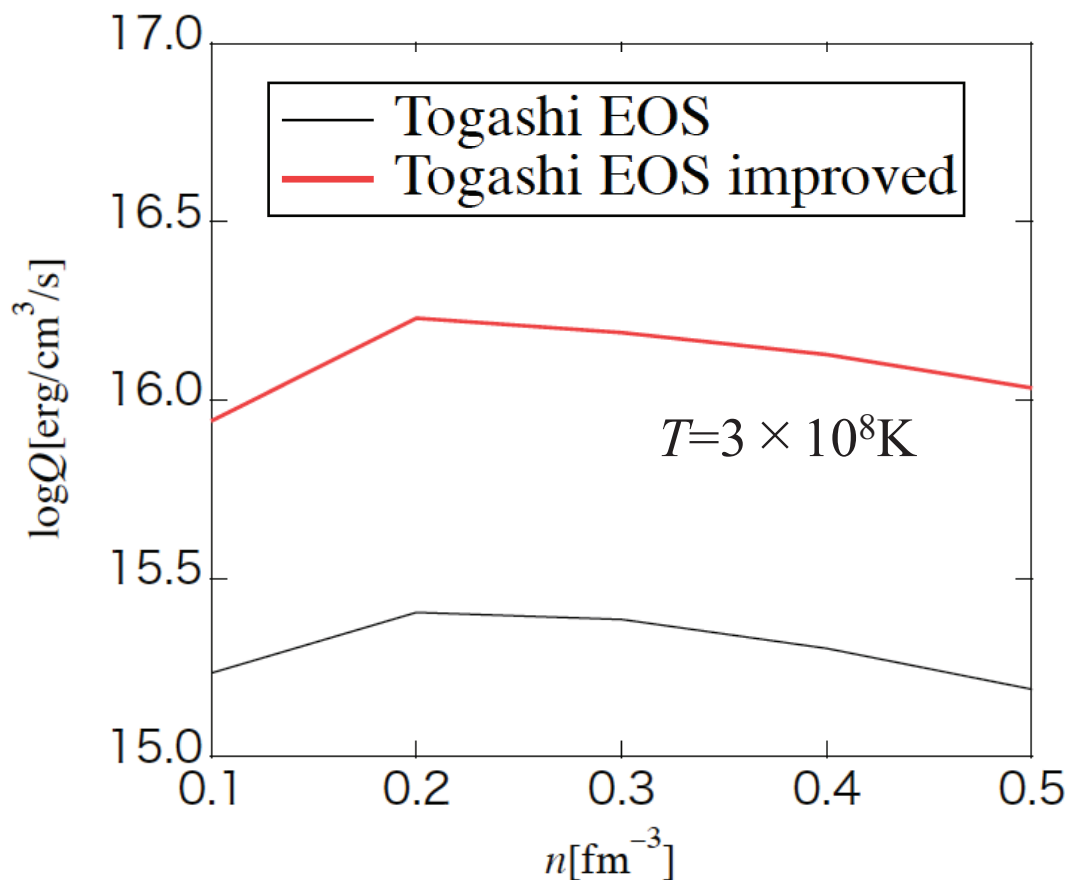
EEF: (AV6'+UIX)



Togashi EOSをそのまま使うと、emissivityはかなり小さな値となる。より精密な多体計算結果 (EEF)を用いると、先行研究(LOCV)結果に近い値となる。

Togashi EOSで用いたhealing distance条件の改良の必要性？

Healing distance条件に関する改良 (Preliminary)



Healing distance条件を修正することで、特にテンソル力相関の範囲が大きくなり、emissivityも大きくなる傾向が得られる。

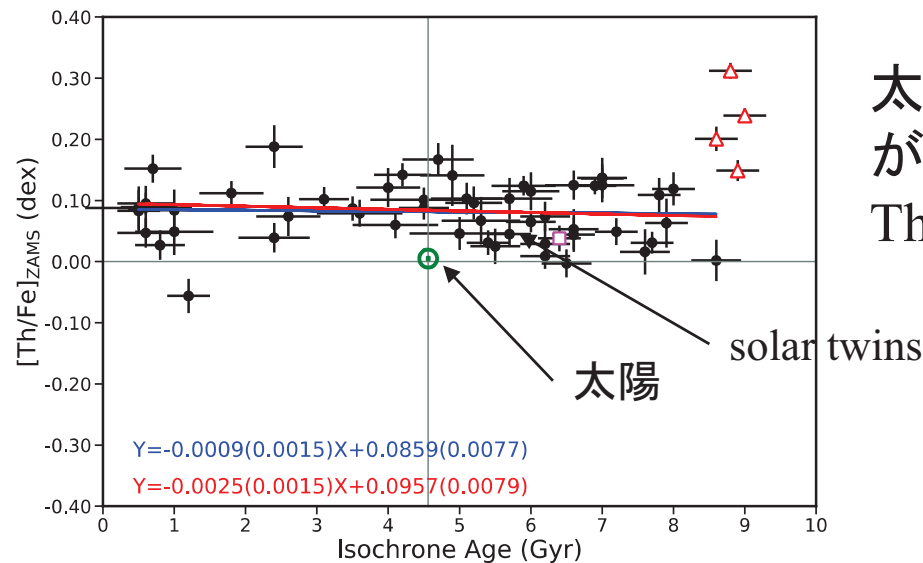
FM: Friman and Maxwell, APJ 232(1979)541.

SS: R. F. Sawyer and A. Soni, APJ 230 (1979)859.

太陽系(地球)のU&Thの起源の解明

(分担者: 辻本)

地球ニュートリノ量を決めるのは地球に内在するUとTh量
太陽系でのそれらの含有量は他の星(惑星系)での量と比べて少ない



太陽近傍には太陽類似星(solar twins)が80個近く同定されているが、その中でもTh量は他と比べて少ない



この理由は太陽系の起源の特異性にある(という主張)

太陽系を含めた星、惑星系のU,Th含有量の理解には、
銀河系の化学進化のみならず**力学進化**が重要な要素となる

銀河系における太陽系の力学進化

銀河系円盤内を星は動径方向に大移動: radial migration

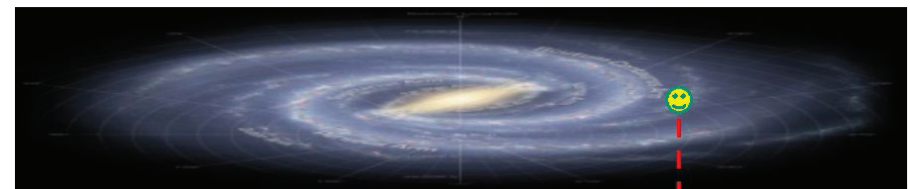
(e.g., Sellwood & Binney 2002; Schoenrich & Binney 2009)

新しい描像: 渦状腕はかつて考えられていたような剛体回転する長寿命なものではなく、短寿命で生成消滅を繰り返す動的に進化する腕である

これらの渦状腕に星が遭遇する時に、重力相互作用による角運動量の輸送が起こり、星が動径方向に移動する



太陽系近傍にある星は様々な場所で生まれた星の集合体である



太陽の化学組成に基づく議論から導かれる

太陽系も例外ではない: 太陽系も銀河の内側からやってきた

しかも、バルジに近い周辺で生まれ、4kpcほど移動した可能性が強く示唆される

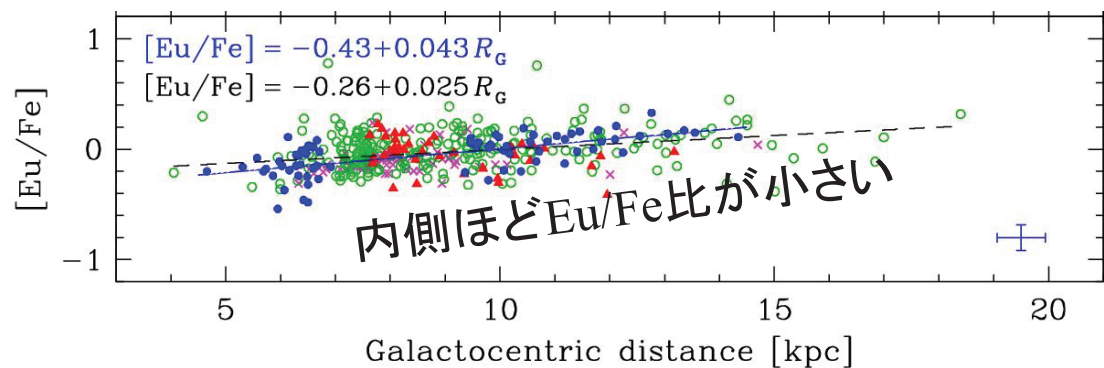
(多くの星は<1kpcほどの移動なのに)



特異性がある

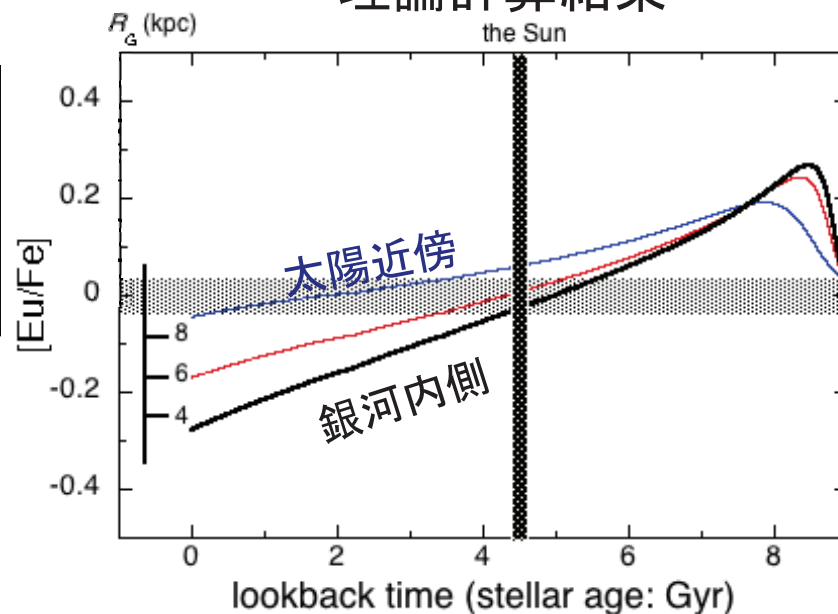
銀河中心に近いほど r 過程元素/鉄の組成比は小さい

観測データ: 銀河面動径方向の組成比分布

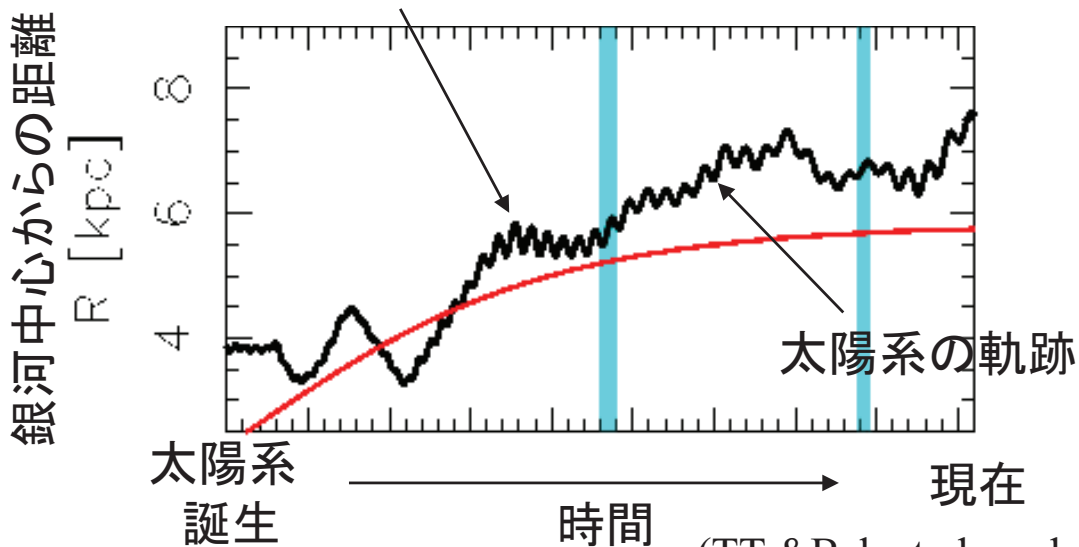


(Euに関する結果だがUやThも同じ傾向があると考えられる)

理論計算結果



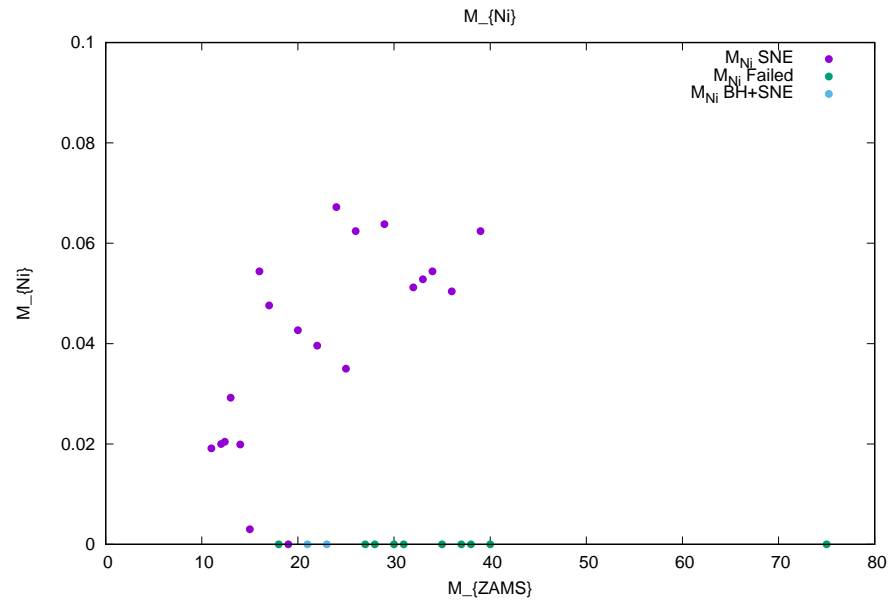
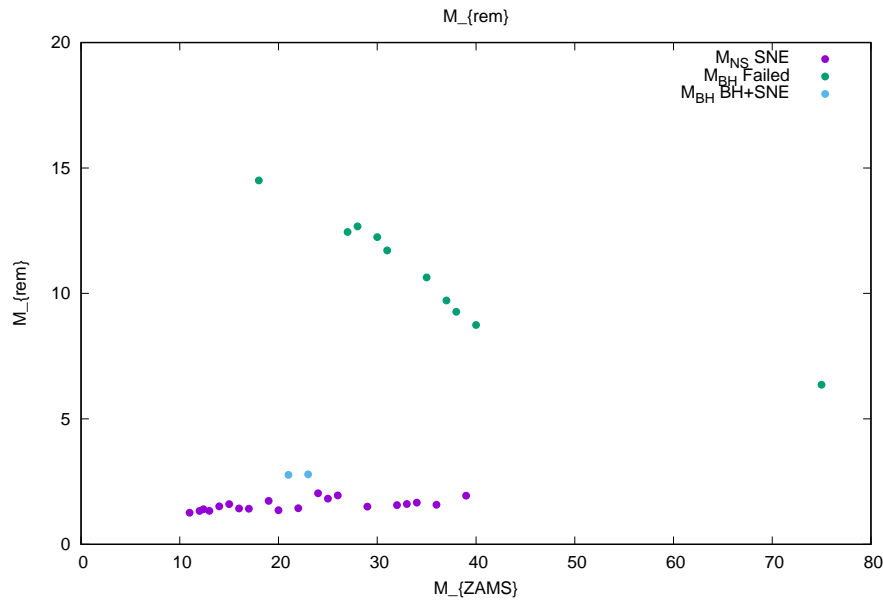
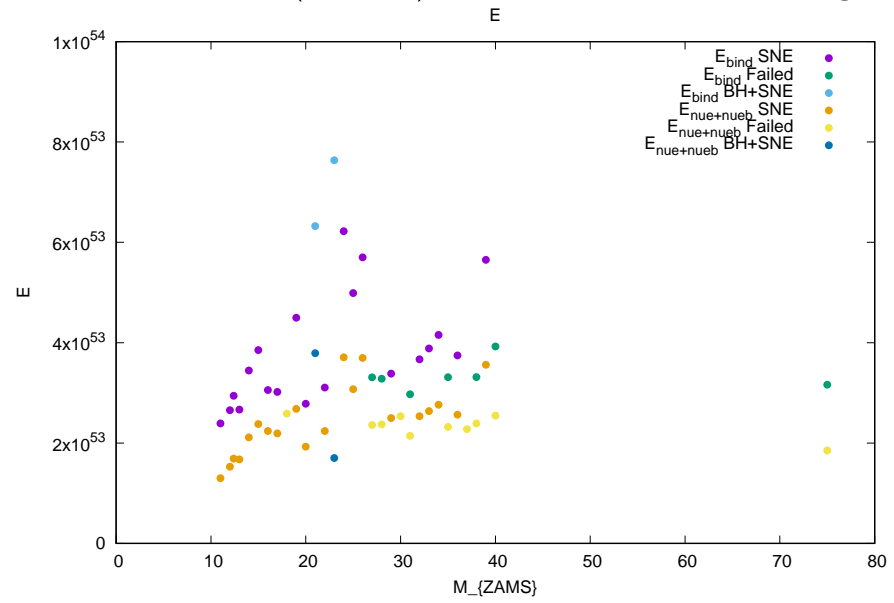
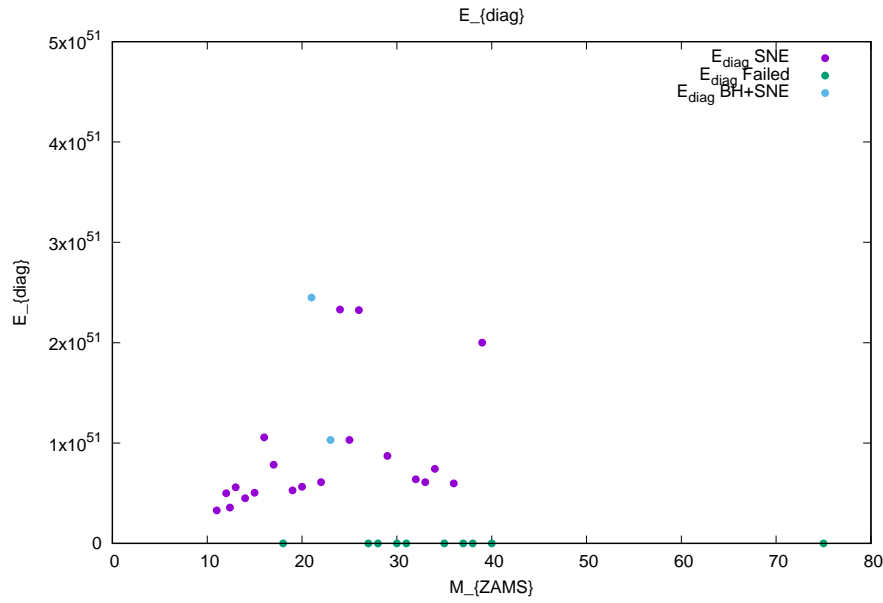
この振動は星のエピサイクル運動



太陽系はUやThなどの r 過程元素が他の元素に比べて相対的に少ない銀河の中心に近いところで生まれ、その後現在の位置まで46億年の時間をかけて移動してきた

(TT & Baba to be submitted)

超新星背景ニュートリノと化学進化の総合的研究に向けて
 重い星の重力崩壊の Müller 方式一次元モデル化を使って、重力崩壊開始時の星の構造データから $E_{\text{exp}}, E_{\nu}, M_{\text{remnant}}, M_{\text{Ni}}$ などを評価。種族合成計算と組み合わせたい。
 Preliminary Results: Woosley, Heger and Weaver (2002), non-rotating Z_{\odot} , $11 - 75M_{\odot}$



今年度

- 超新星爆発からのニュートリノ放出を定量的かつ正確に計算するために、ニュートリノ輸送に人為的な近似のない空間3次元シミュレーションを、ニュートリノ加熱による対流やSASIが始まる後期につなげる。また、ミューオンの寄与や核子の多体効果を考慮した長時間の原始中性子星冷却の計算を球対称のもとで行うのと同様に、昨年度開発した球対称を仮定しない多次元計算用のコードによるプロダクティブランも行う。
- 原始中性子星冷却からのニュートリノ放出における核物質状態方程式依存性の研究で得られた成果を応用し、近傍で超新星爆発が起こった時に検出されるイベントを評価する。また、現時点で観測されている中性子星の質量・半径の測定値から1つの超新星が放出するニュートリノの総量の上限・下限を見積もり、超新星背景ニュートリノのフラックス予測の際の不定性評価につなげる。
- Togashi EOS と自己無矛盾なニュートリノ反応率を計算するため、healing distance における微係数も連続であるような、より精度の高い相関関数を求め、修正URCA過程ニュートリノ反応率の改善を試みる。
- 太陽系がどこで生まれ、どのような道筋を経て現在の位置へ至ったかを明らかにすることにより、地球ニュートリノ発生源であるウラン、トリウム地球内在量の普遍性を議論し、種族合成・超新星ニュートリノ放出量の評価と組み合わせた総合的な研究につなげる。