

# 連星中性子星合体における **r-process** 元素合成

Sekiguchi et al. accepted to PRD

**関口雄一郎** (京都大学基礎物理学研究所)

With 和南城伸也 (RIKEN), 西村信哉 (Keel Univ.), 久徳浩太郎 (UWM)  
木内建太 (YITP), 柴田大 (YITP)

# r-process 元素合成(金の起源)はどこで起こっているか?

## ▶ 超新星爆発: (*Burbidge et al. 1957*)

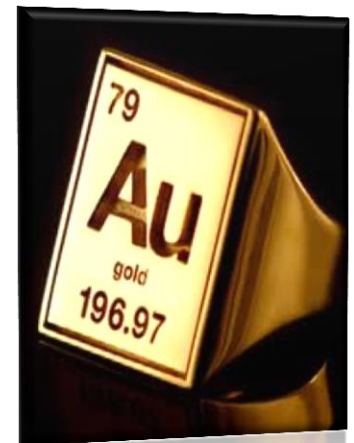
- ▶ 従来考えられていたよりもエントロピーが低い
- ▶ ニュートリノ加熱機構ではニュートリノを十分に吸収する必要があるが、その場合には低  $Y_e$  (バリオン当りの電子数) 環境を保てない
- ▶ 観測的制約を満たすのはさらに困難
  - ▶ Universality : r-process 合成パターンは太陽組成に近い



2007年刊

## ▶ 連星中性子星の合体: (*Lattimer & Schramm 1974*)

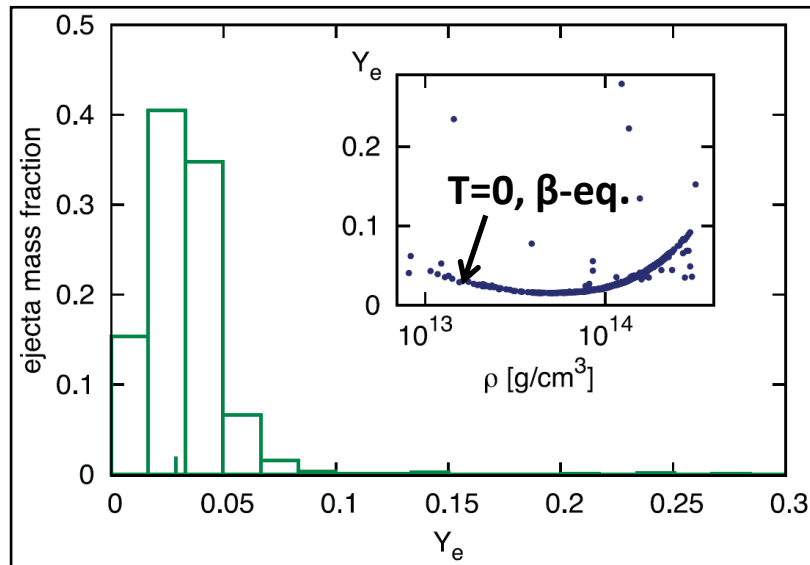
- ▶ 近年注目を集める
- ▶ Wanajo, YS et al. (2014)



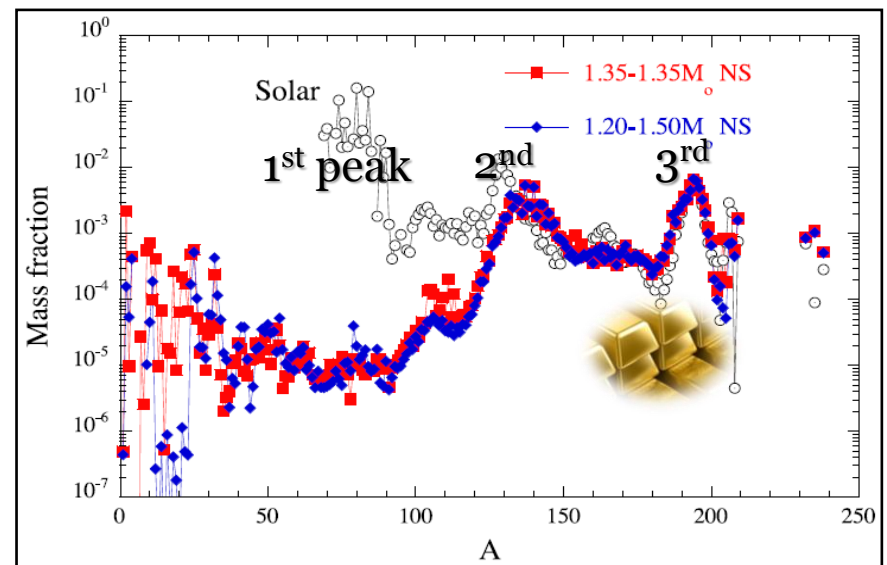
# 連星中性子星合体: too neutron-rich ?

## ▶ Korobkin et al. 2012; Rosswog et al. 2013

- ▶ **ニュートン重力理論**での結果: Tidal interaction による質量放出
- ▶ 基本的に中性子星物質がちぎれて放出されるので低温・中性子過剰 ( $Y_e < 0.1$ )
  - ▶ strong r-process with fission recycling only 2<sup>nd</sup> ( $A \sim 130$ ;  $N=82$ ) and 3<sup>rd</sup> ( $A \sim 195$ ;  $N=126$ ) peaks are produced
- ▶ r-process が効率的に起こりすぎる!
  - ▶  $A \sim 80-130$  について太陽組成のパターンを再現できない



Korobkin et al. (2012) MNRAS 426 1940



Goriely et al. (2011) ApJL 738 32

# 計算コードの概要

---

- ▶ アインシュタイン方程式: Puncture-BSSN/Z4c formalism
- ▶ 一般相対論的輻射流体
  - ▶ 輻射移流項の計算: Truncated **Moment scheme** (*Shibata et al. 2011; Thorne 1981*)
    - ▶ 状態方程式: 有限温度核物質状態方程式 + 低密度での Timmes EOS への拡張
    - ▶ gray or multi-energy but advection in energy-space is not included
    - ▶ Fully covariant and relativistic M-1 closure
  - ▶ ソース項の計算: two options
    - ▶ 陰的解法: **Bruenn's prescription w.o. 電子散乱, pair processes**
      - 超新星 modelling 業界の minimum setup
    - ▶ 陽的解法: 京でのシミュレーションに採用
      - E-captures: thermal unblocking, weak magnetism; NSE rate
      - Iso-energy scattering : recoil, Coulomb, finite size
      - Electron scattering in an approximate manner
      - $E\pm$  annihilation, plasmon decay, bremsstrahlung
      - Diffusion rate (Rosswog & Liebendoerfer 2004)
  - ▶ レプトン数保存の計算

# 2014年度の計算

---

- ▶ K-computer における大規模計算の実行、収束性の確認
  - ▶ 解像度: グリッド幅=150m, 864ノード
  - ▶ 格子点: (各階層の格子点)<sup>3</sup> × (階層の段数)=580 × 580 × 290 × 9
  - ▶ 時間ステップ: 約20万ステップ、物理時間約50ms
  - ▶ 所要計算時間: 約50 - 70万ノード時間/model
- ▶ 状態方程式・質量比を変えたサイエンスラン
  - ▶ **状態方程式探査は完了: r過程元素合成の'universality'調べる**
    - ▶ 状態方程式3モデル+ $\alpha$
  - ▶ 連星の総質量・質量比を変えた計算は継続中
    - ▶ 質量比3モデル
    - ▶ 総質量依存性も適宜調査

# 2014年度の成果(1)：状態方程式依存性

## ▶ 有限温度状態方程式を用いた系統的シミュレーションが可能に

▶ Thanks to M. Hempel

## ▶ 相対論的平均場

▶ **TM1 (Shen EOS)**

▶ TMA

▶ **DD2**

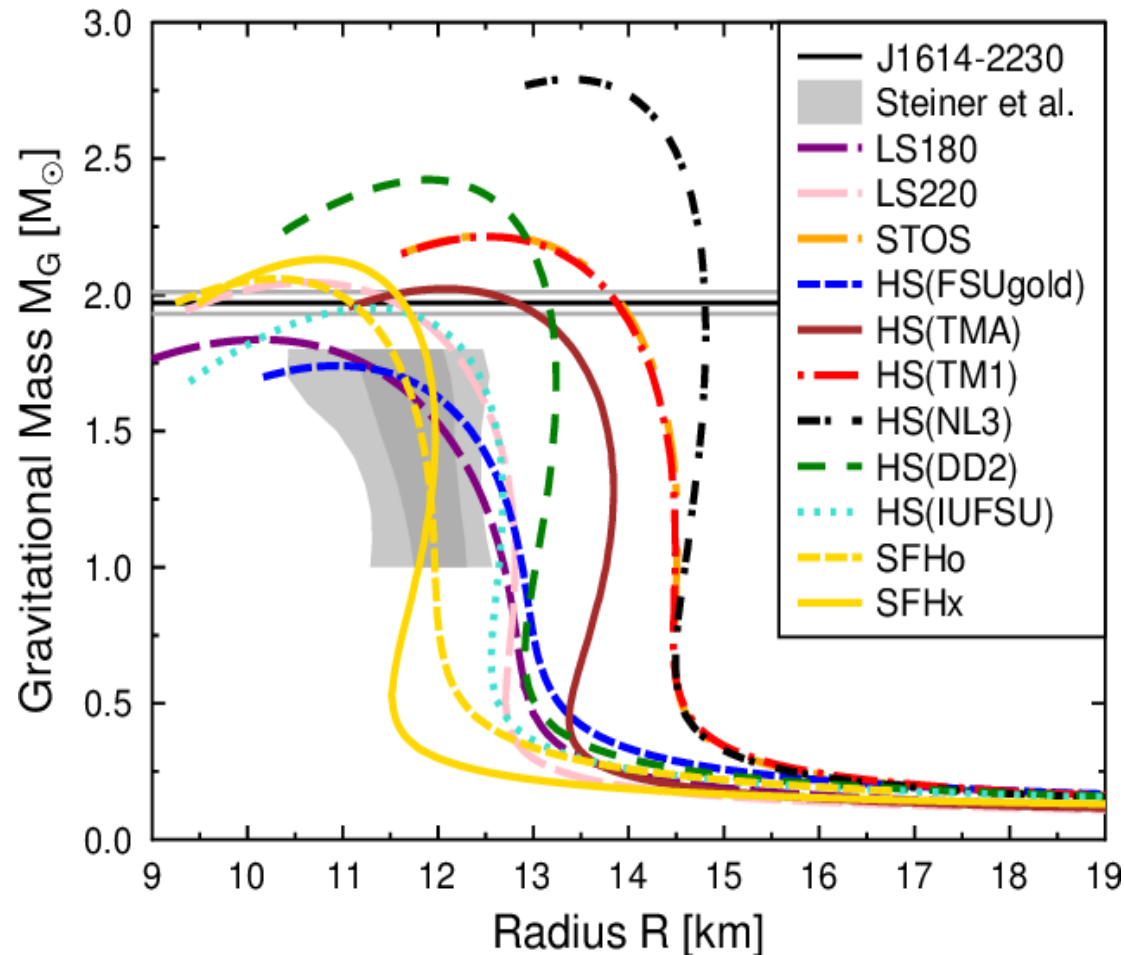
▶ IUFSU

▶ **SFHo**

▶ カイラル有効場理論、  
中性子星、X線バースト  
の観測とコンシステント

半径：小  
↓

## ▶ Ejecta の総量・性質の 状態方程式への依存性を 明らかにした



# 連星中性子星の合体と r-process 元素合成

▶ Mass ejection from BNS merger : two components

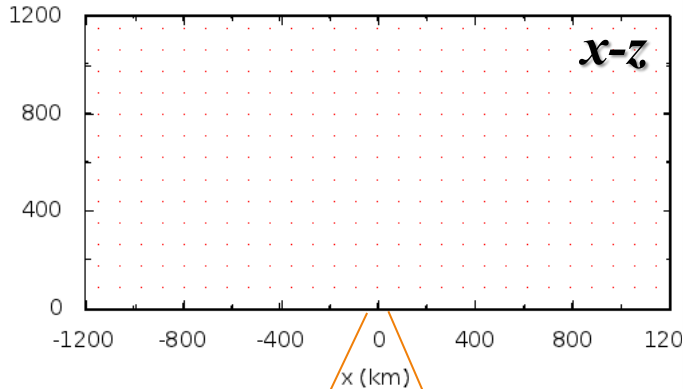
▶ 潮汐破壊に伴う成分

▶ 基本的に $\beta$ -平衡にある冷たい中性子星物質  $\Rightarrow$  低温、**low  $Y_e$**

▶ 衝撃波加熱による成分

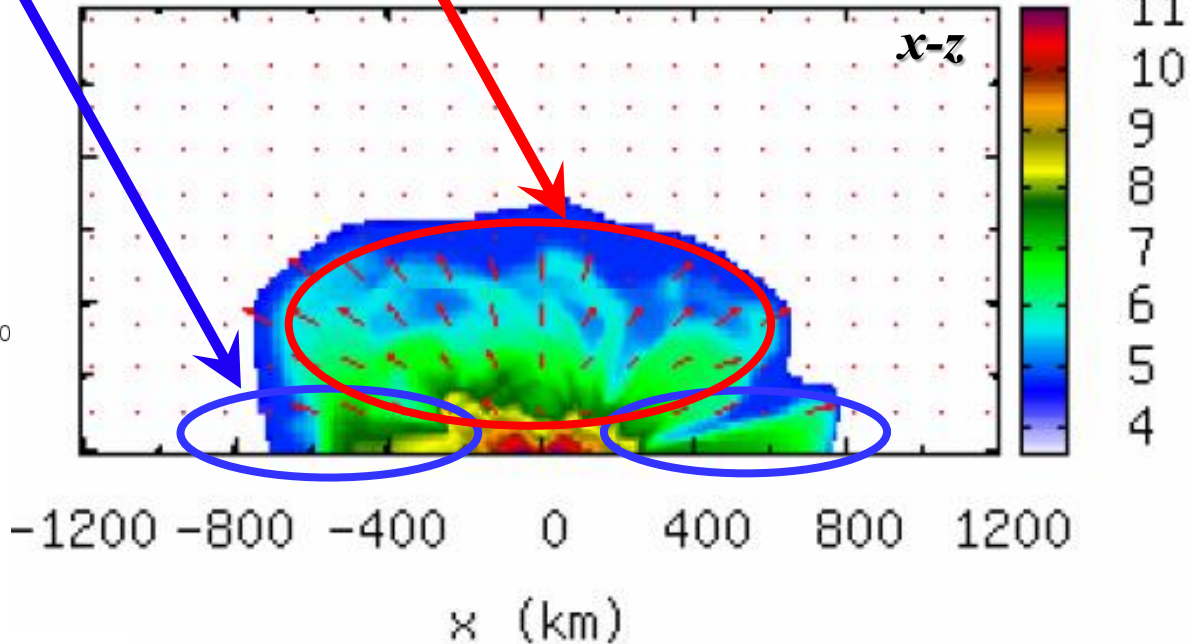
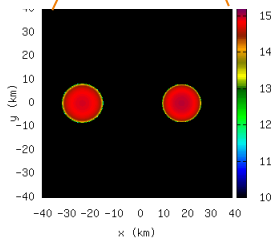
▶ 高温、弱い相互作用によって  $Y_e$  が上昇 (中性子過剰を抑える方向  $Y_e \uparrow$ )

t=0 ms



animation by Hotokezaka

7



# 質量放出の状態方程式(EOS)依存性

## ▶ ‘硬いEOS’

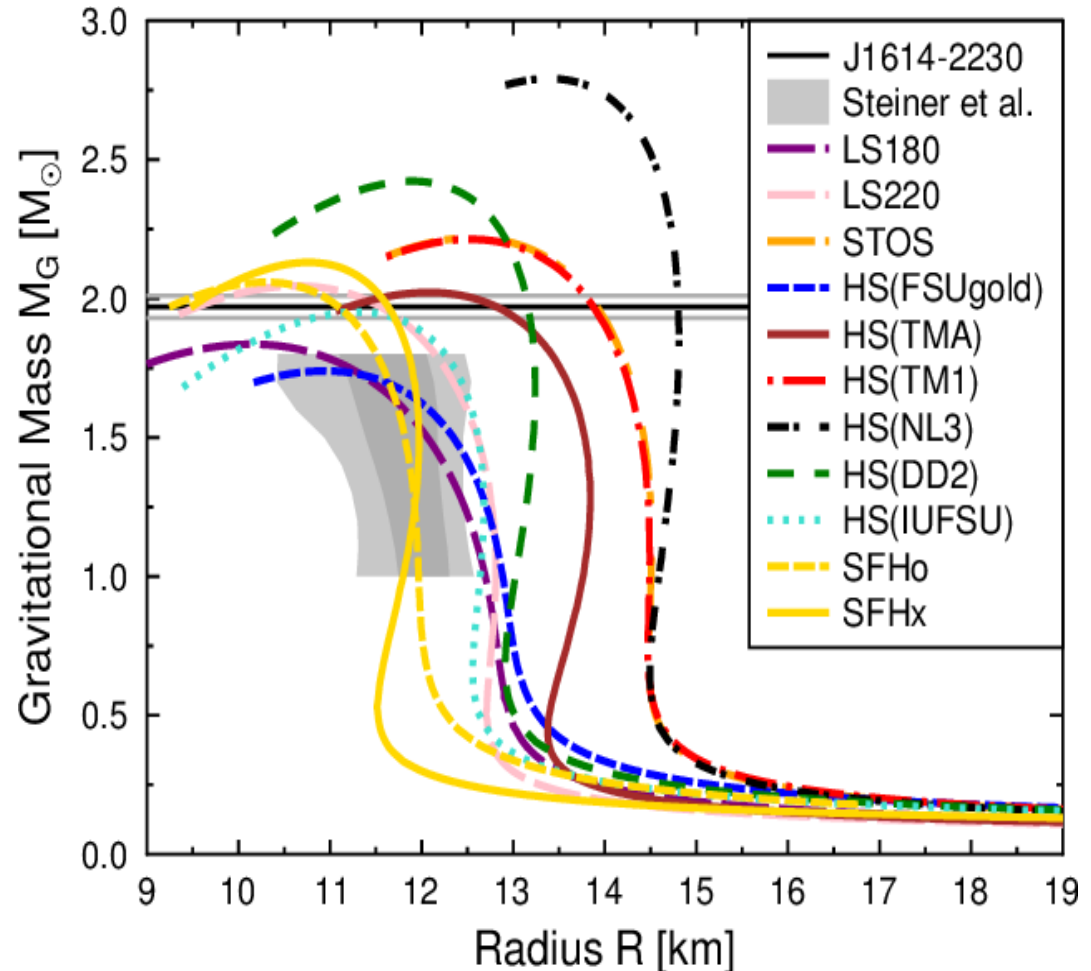
- ▶ **TM1**
- ▶ 中性子星半径:大
- ▶ 潮汐破壊成分 dominant
- ▶ 冷たい中性子星物質 dominant (low  $Y_e$ )

## ▶ ‘柔らかいEOS’

- ▶ **SFHo**
- ▶ 中性子星半径:小
- ▶ 潮汐成分 less dominant
- ▶ 合体時高速、強い圧縮
- ▶ 衝撃波加熱成分 dominant

## ▶ ‘中間のEOS’

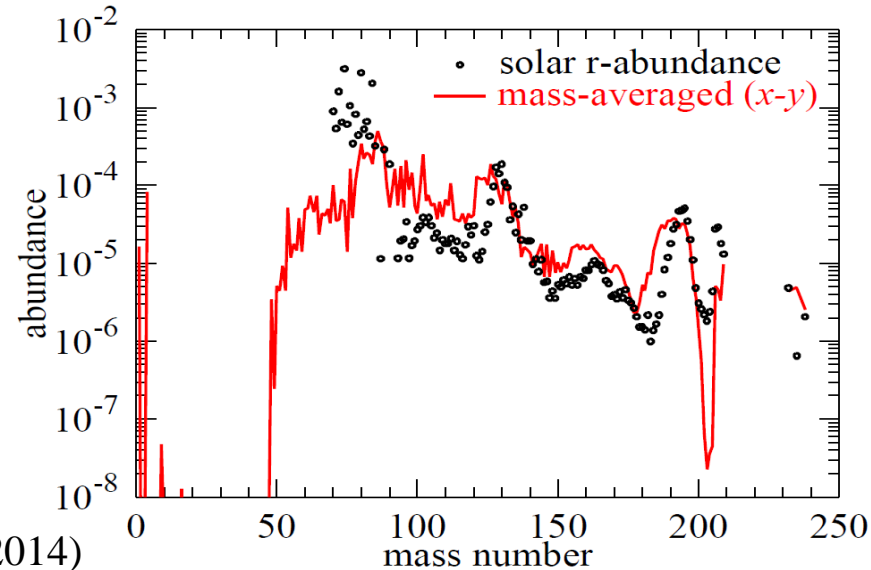
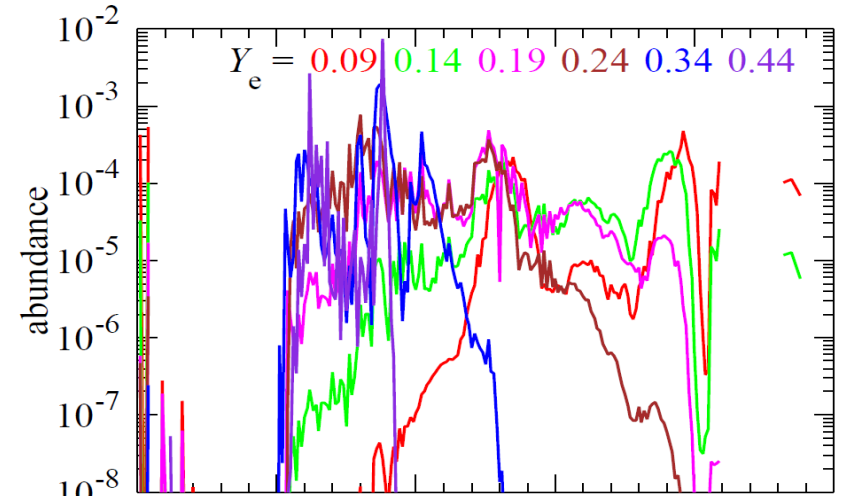
- ▶ **DD2**





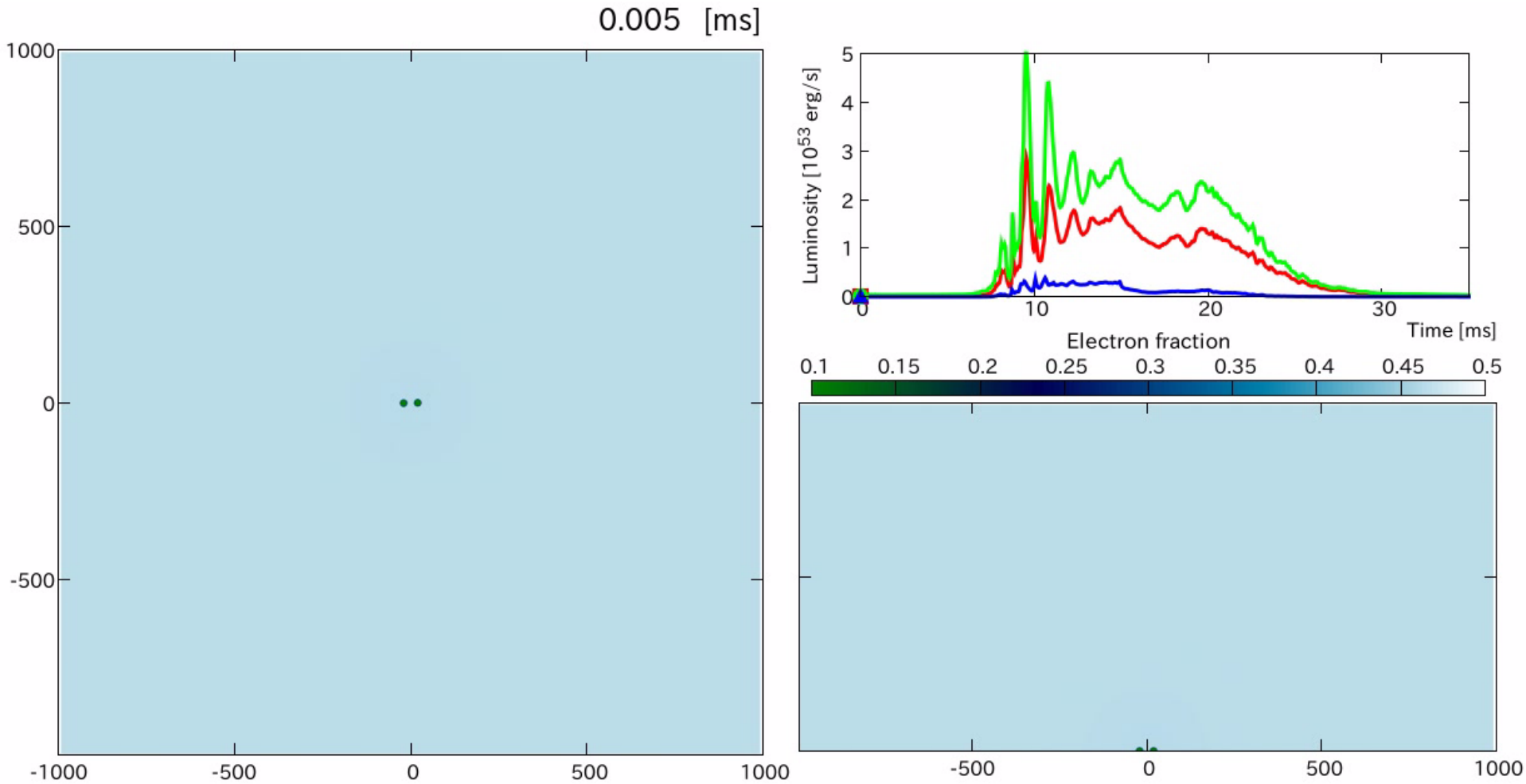
# 中性子捕獲反応は $Y_e$ に極めて敏感

- ▶ 観測からの示唆:  
太陽組成が示すr過程元素の  
パターンは、異なる様々なパターンの  
重ね合わせの結果ではなく、  
単一のr過程イベントそれぞれが  
太陽組成に近いパターンを作る
- ▶ Ejecta の組成が重要
  - ▶ ニュートリノ反応・輸送を考慮して  
弱い相互作用による  $Y_e$  の変化を追跡する  
必要性
  - ▶ ⇒ ニュートリノ輻射流体計算
- ▶ 自然は最適なブレンディングを選ぶか？
  - ▶ 一般相対論的輻射流体計算 on K

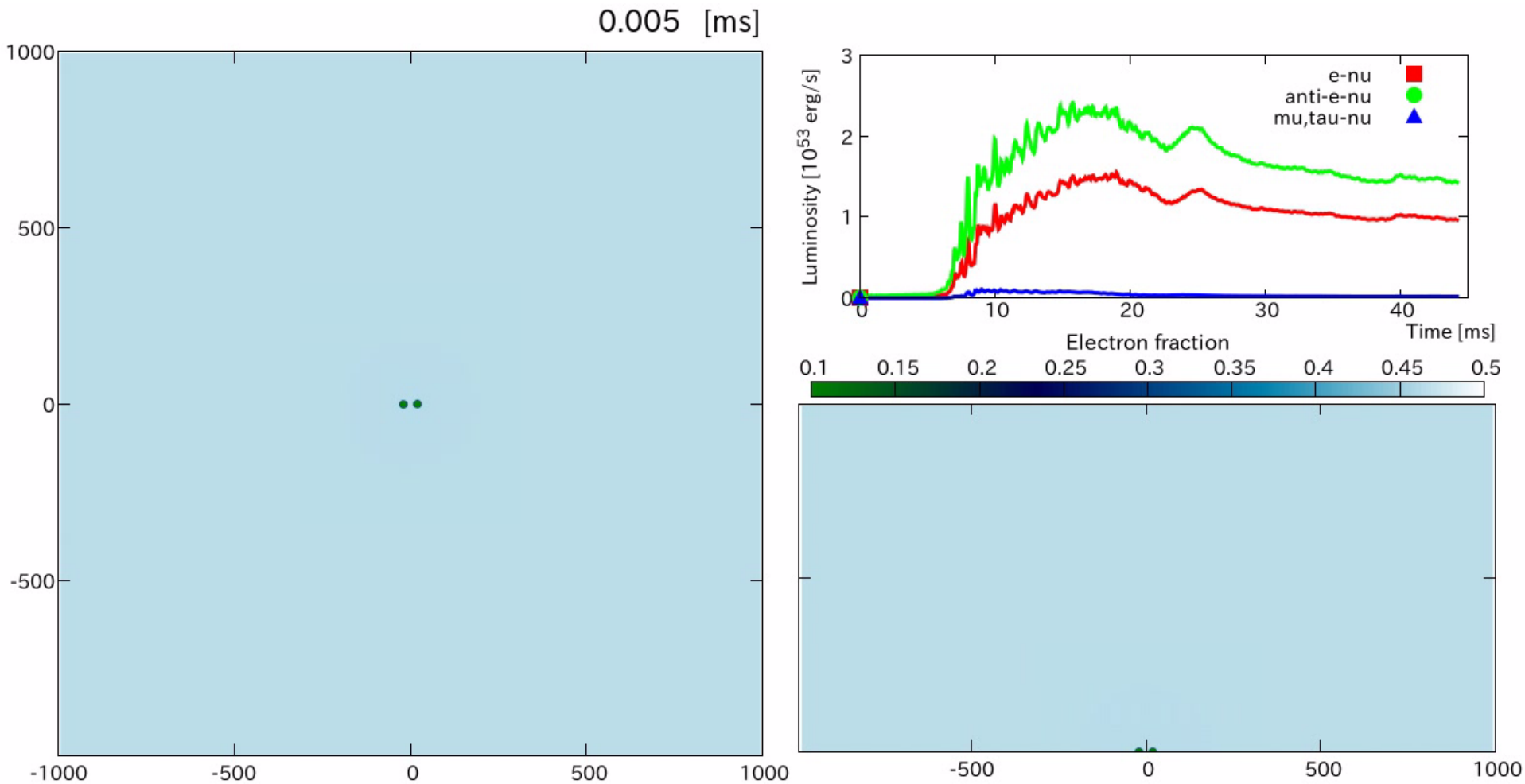


Wanajo, Sekiguchi et al. (2014)

# SFHo(柔らかいEOS): 電子モル分率

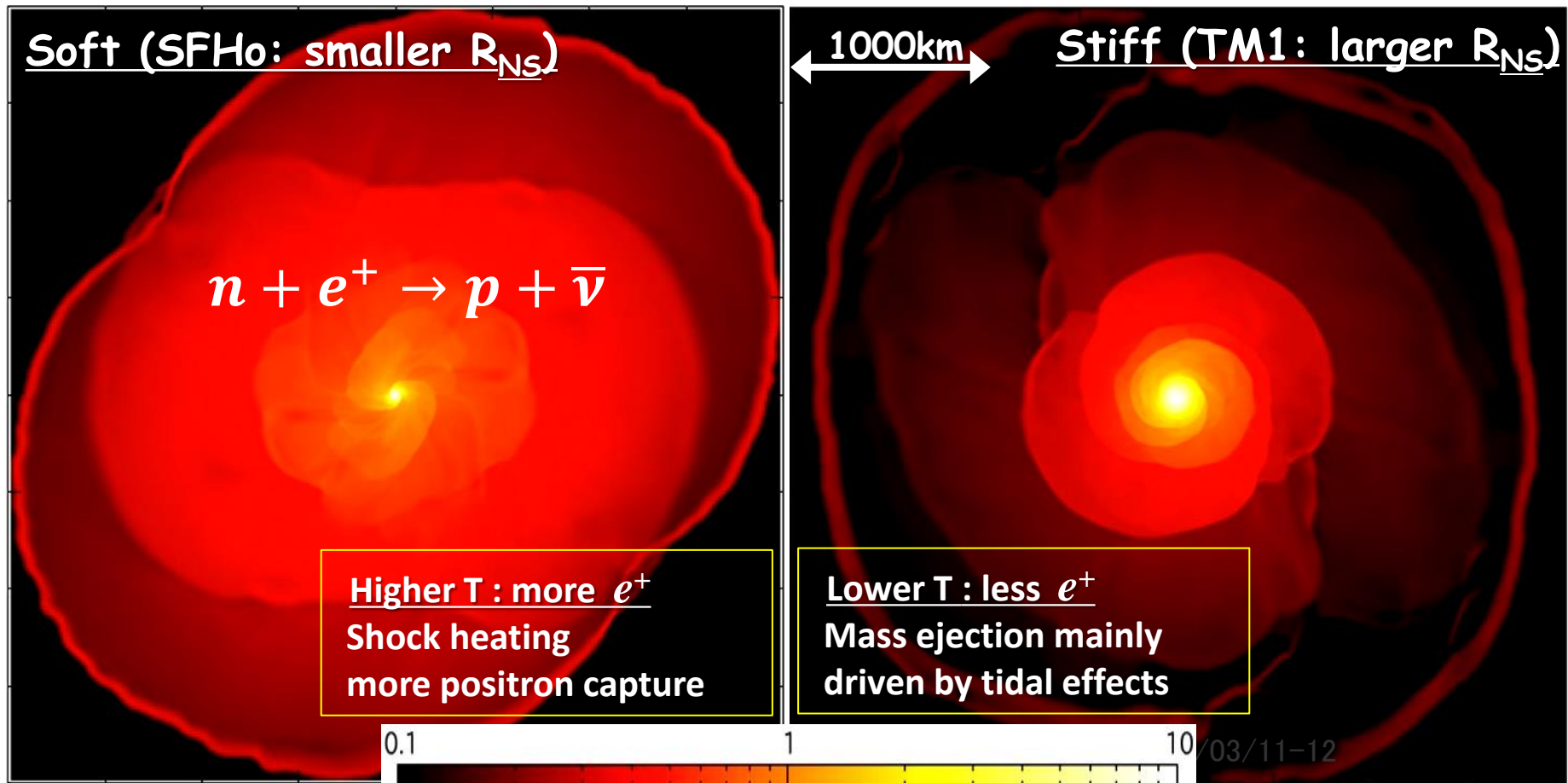


# DD2(中間のEOS): 電子モル分率



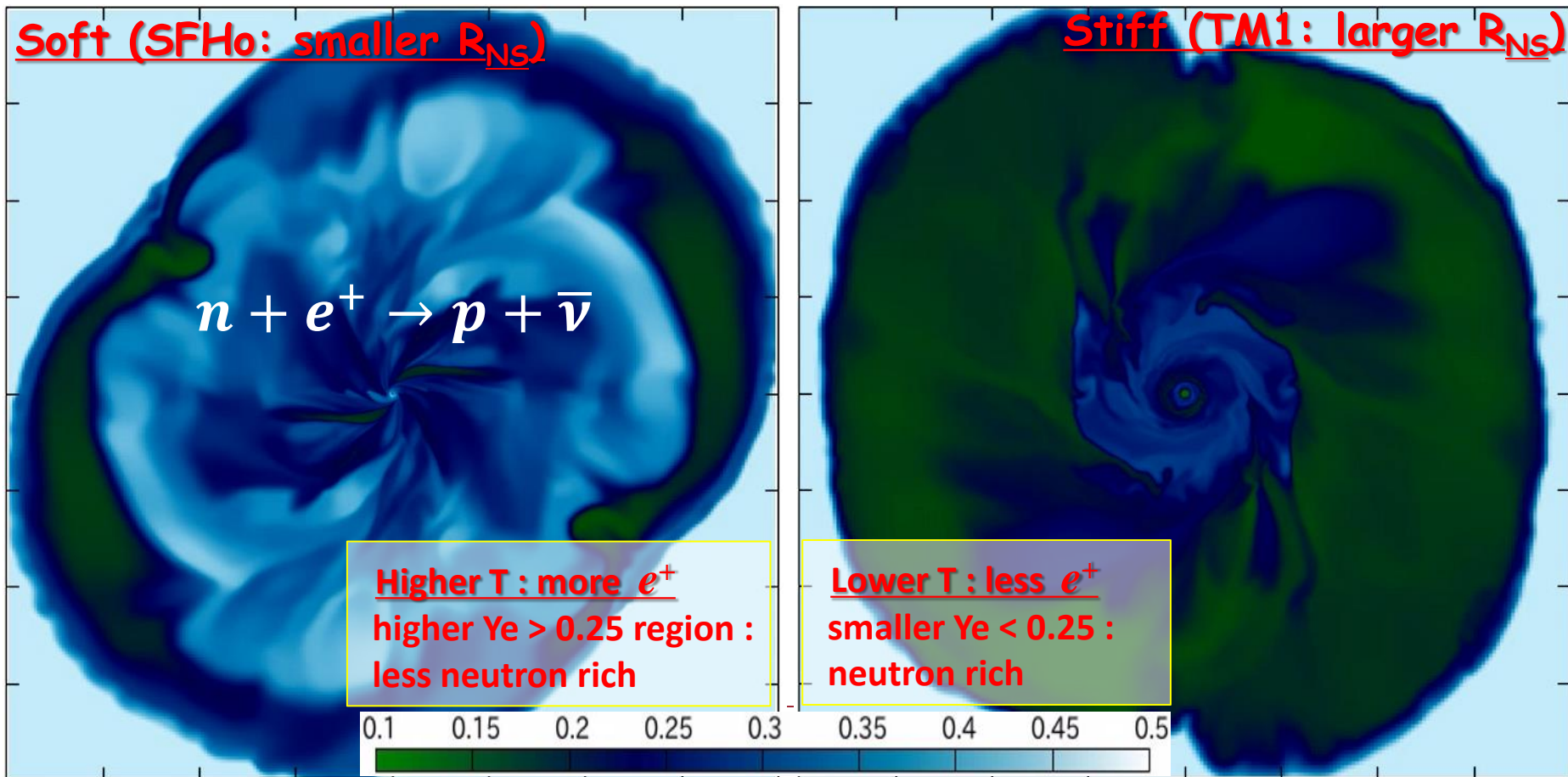
# Soft(SFHo) vs. Stiff(TM1): Ejecta temperature

- ▶ Soft EOS (smaller  $R_{NS}$ ) (SFHo): 衝撃波加熱により温度が上昇  
⇒ 陽電子捕獲により中性子過剰率が下がる
- ▶ Stiff EOS (larger  $R_{NS}$ ) (TM1): ejectaは温度の低い潮汐成分 ⇒ 低 $Y_e$

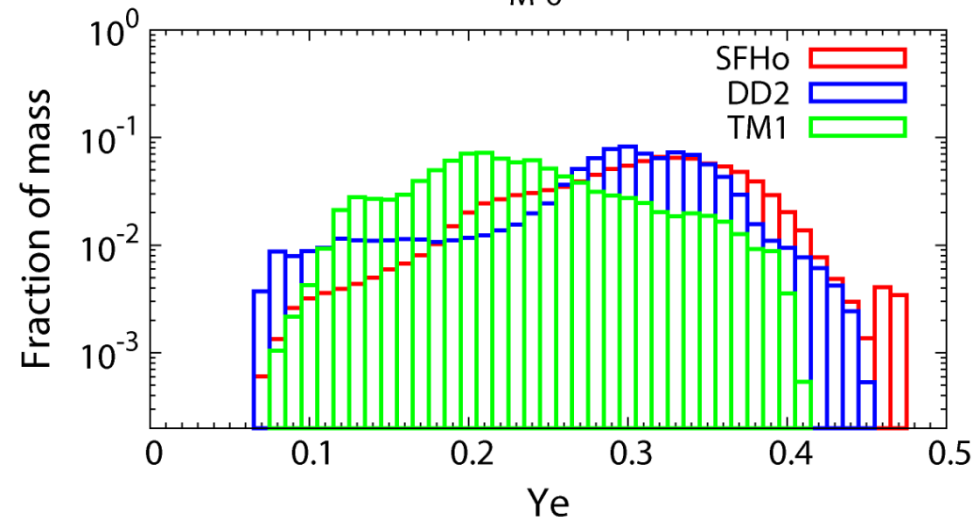
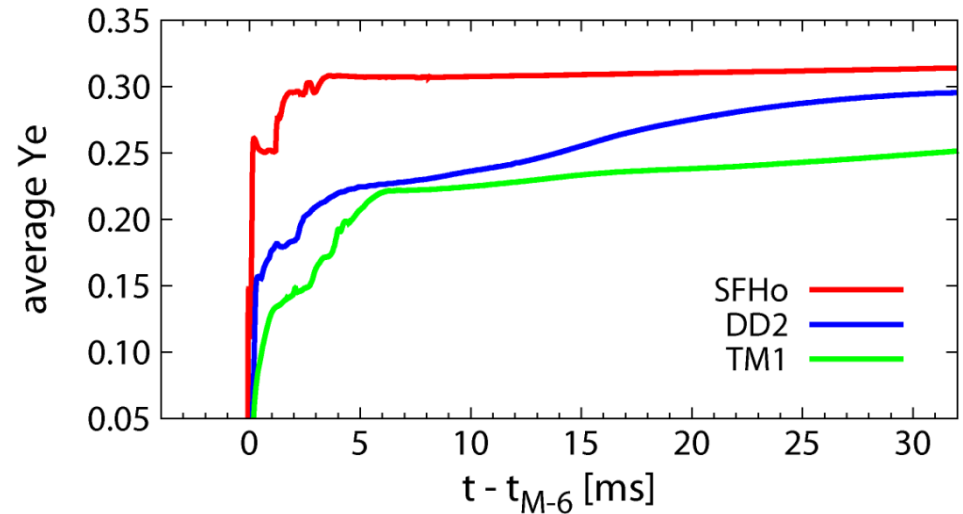
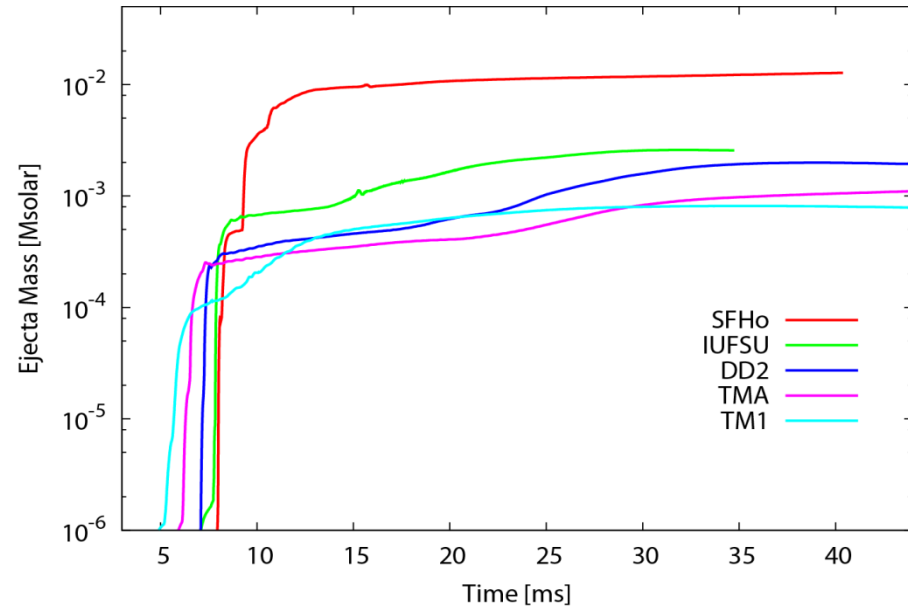


# Soft(SFHo) vs. Stiff(TM1): Ejecta temperature

- ▶ Soft EOS (smaller  $R_{NS}$ ) (SFHo): 衝撃波加熱により温度が上昇  
⇒ 陽電子捕獲により中性子過剰率が下がる
- ▶ Stiff EOS (larger  $R_{NS}$ ) (TM1): ejectaは温度の低い潮汐成分 ⇒ 低 $Y_e$

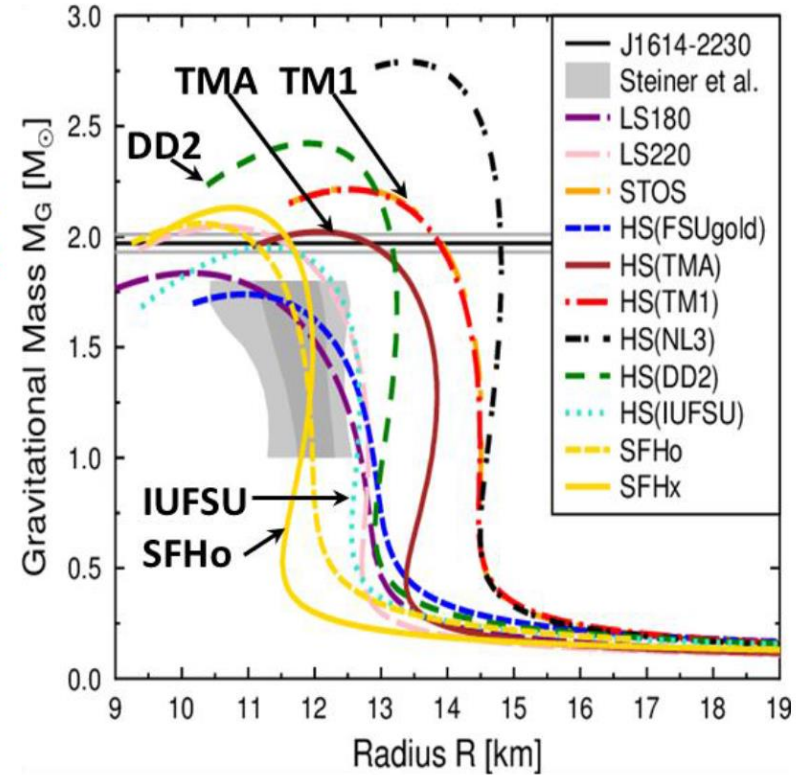
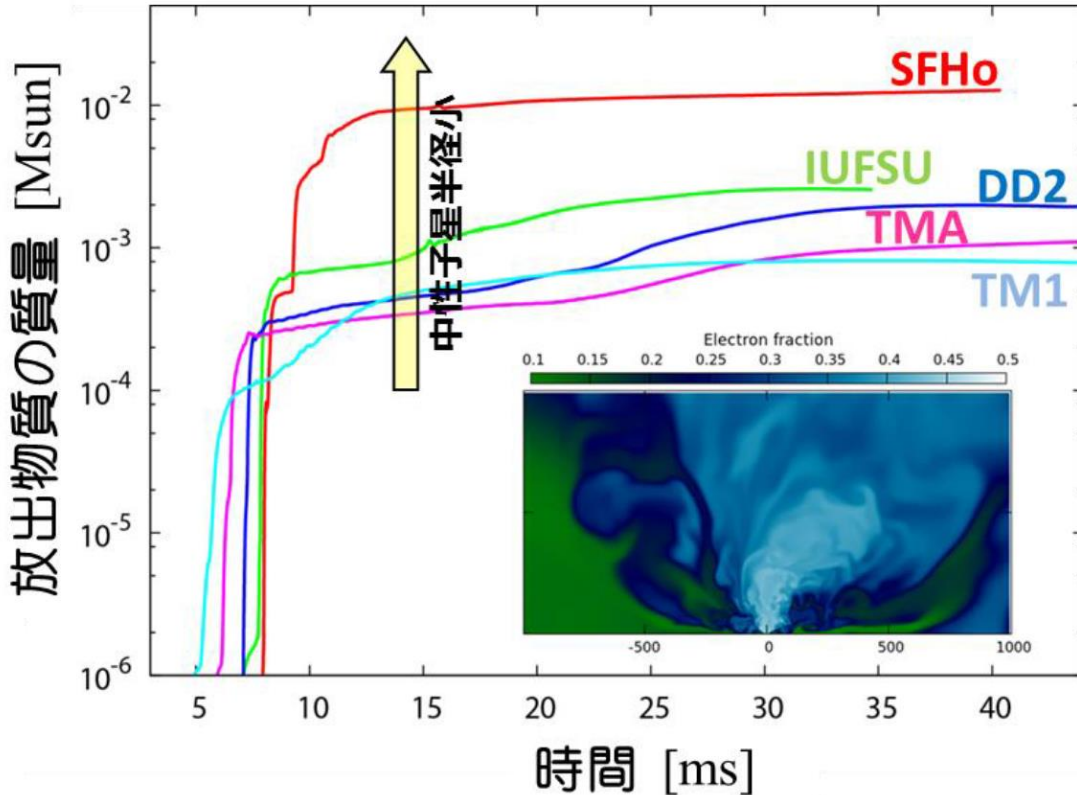


# 状態方程式依存性：1.35-1.35 NS-NS



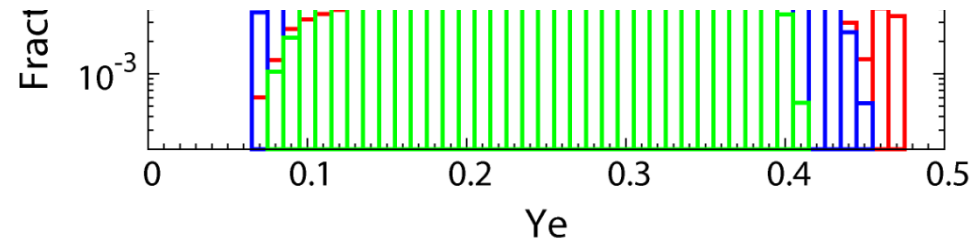
- ▶ Mej is larger for softer EOS  
Consistent with piecewise-polytrope studies
- ▶ **Only SFHo will give Mej  $\sim 0.01$  Msun**
- ▶ Signature of  $v$ -driven components  
 $\sim$  several  $\times 10^{-4}$  Msun @ 35 ms after merger

# 状態方程式依存性：1.35-1.35 NS-NS

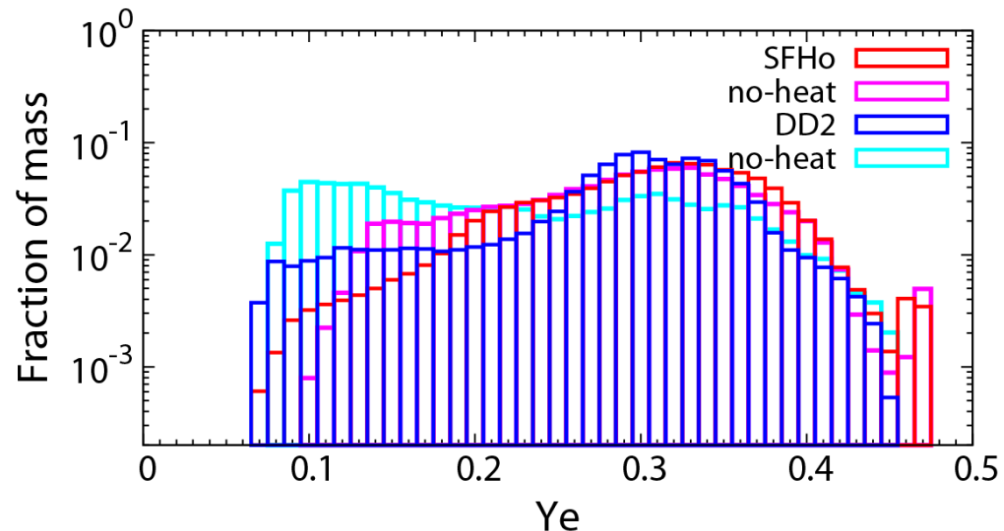
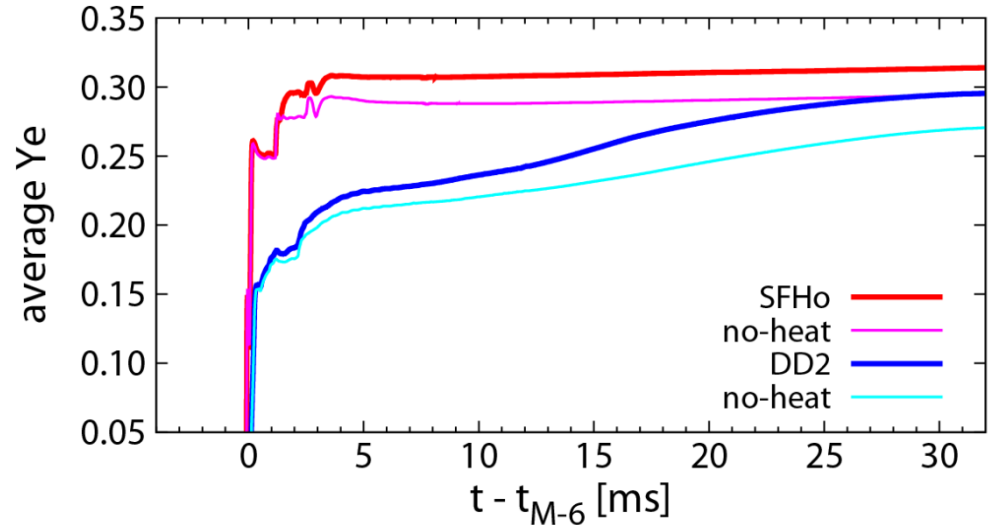
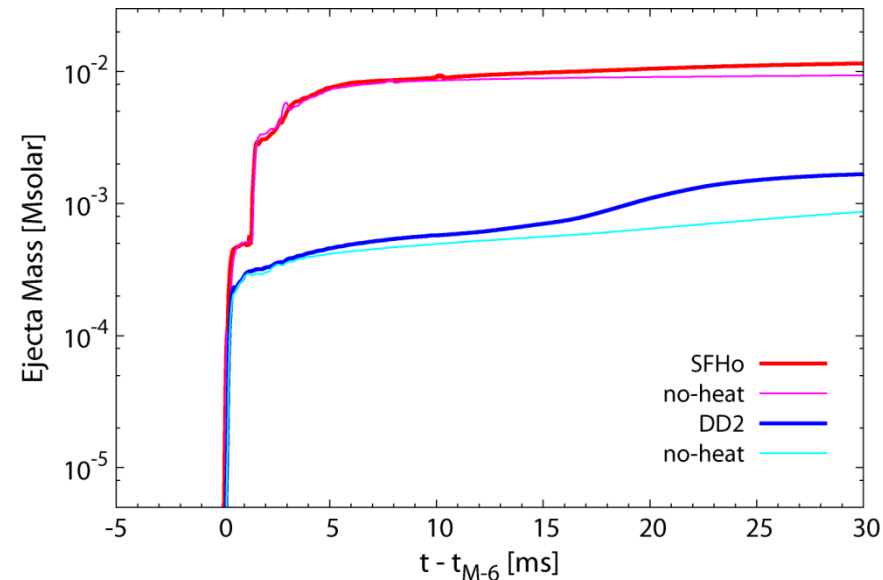


Only SFHo will give me  $0.02 M_{\text{sun}}$

- Signature of  $\nu$ -driven components  
 $\sim \text{several} \times 10^{-4} M_{\text{sun}}$  @ 35 ms after merger



# 2014年の成果(2)：ニュートリノの重要性



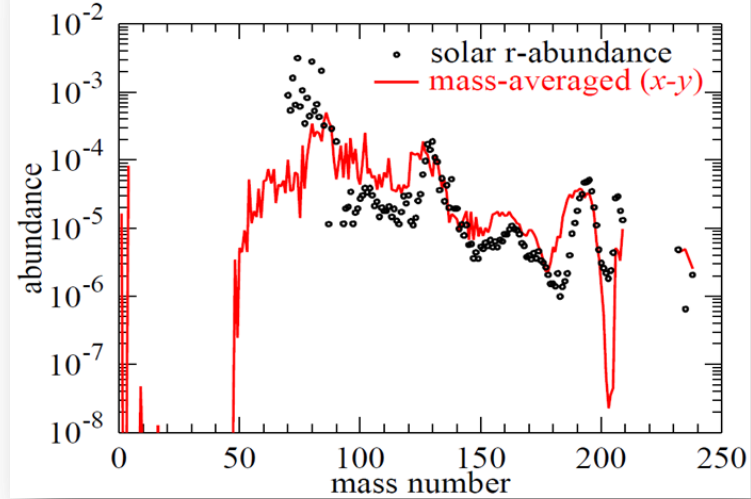
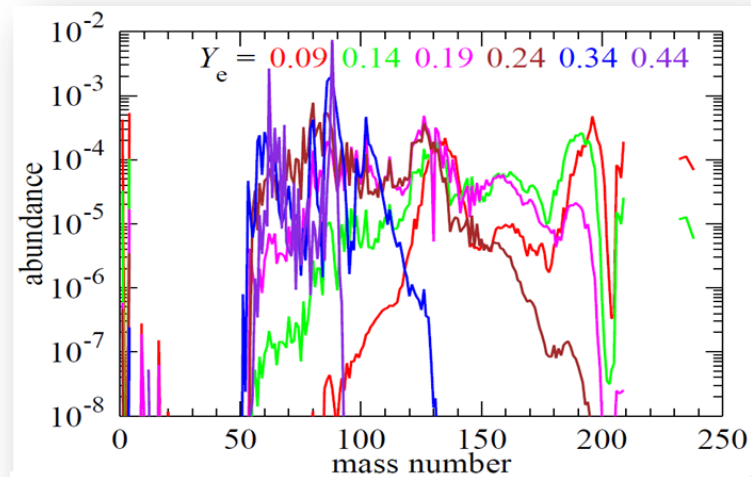
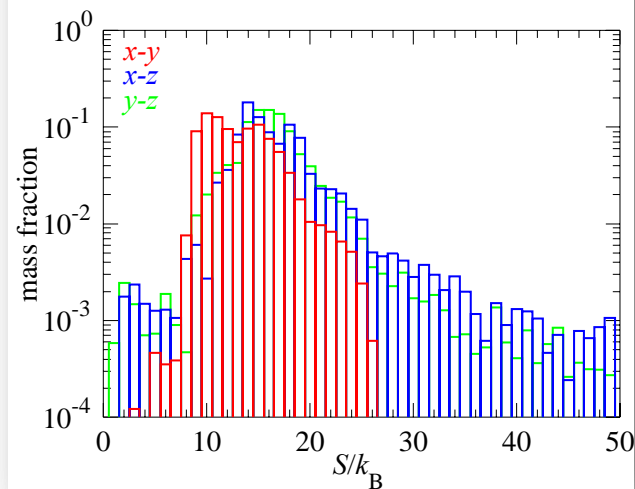
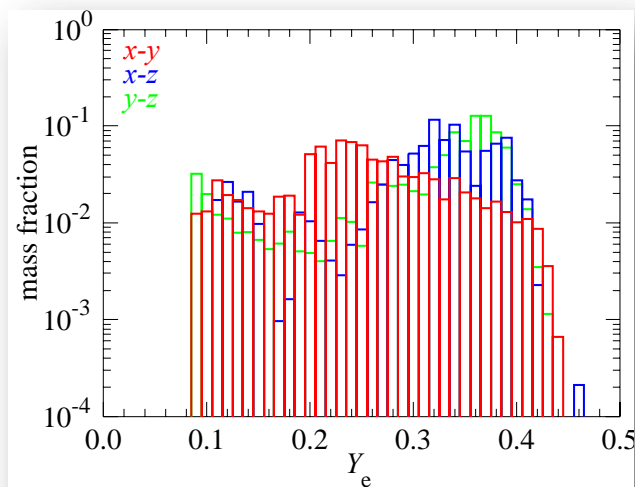
- ▶ Amount of ejecta mass can be increased  $\sim 10^{-3}$  Msun
- ▶ Average Ye can change 0.02~0.03 depending on EOS : effect is stronger for stiffer EOS where HMNS survive in a longer time





# Universality の達成 (SFHo)

Wanajo. YS et al ApJL (2014)



▶ The  $Y_e$ -distribution histogram has a broad, flat structure (*Wanajo, Sekiguchi, et al. (2014).*)

- ▶ Mixture of all  $Y_e$  gives a good agreement with the solar abundance !
- ▶ Robustness of Universality (dependence on binary parameters)

# まとめ

## ▶ 連星中性子星合体

- ▶ Universality の再現: Wanajo, YS, et al. ApJL (2014)
  - ▶ 柔らかい状態方程式(SFHo)の場合
  - ▶ 状態方程式依存性: 解析進行中

## ▶ 状態方程式依存性:

- ▶ Sekiguchi et al. PRD accepted

## ▶ ニュートリノの重要性:

- ▶ Sekiguchi et al. PRD accepted

## ▶ 連星パラメータ依存性

- ▶ 計算進行中
- ▶ 2015年度も計算継続

