

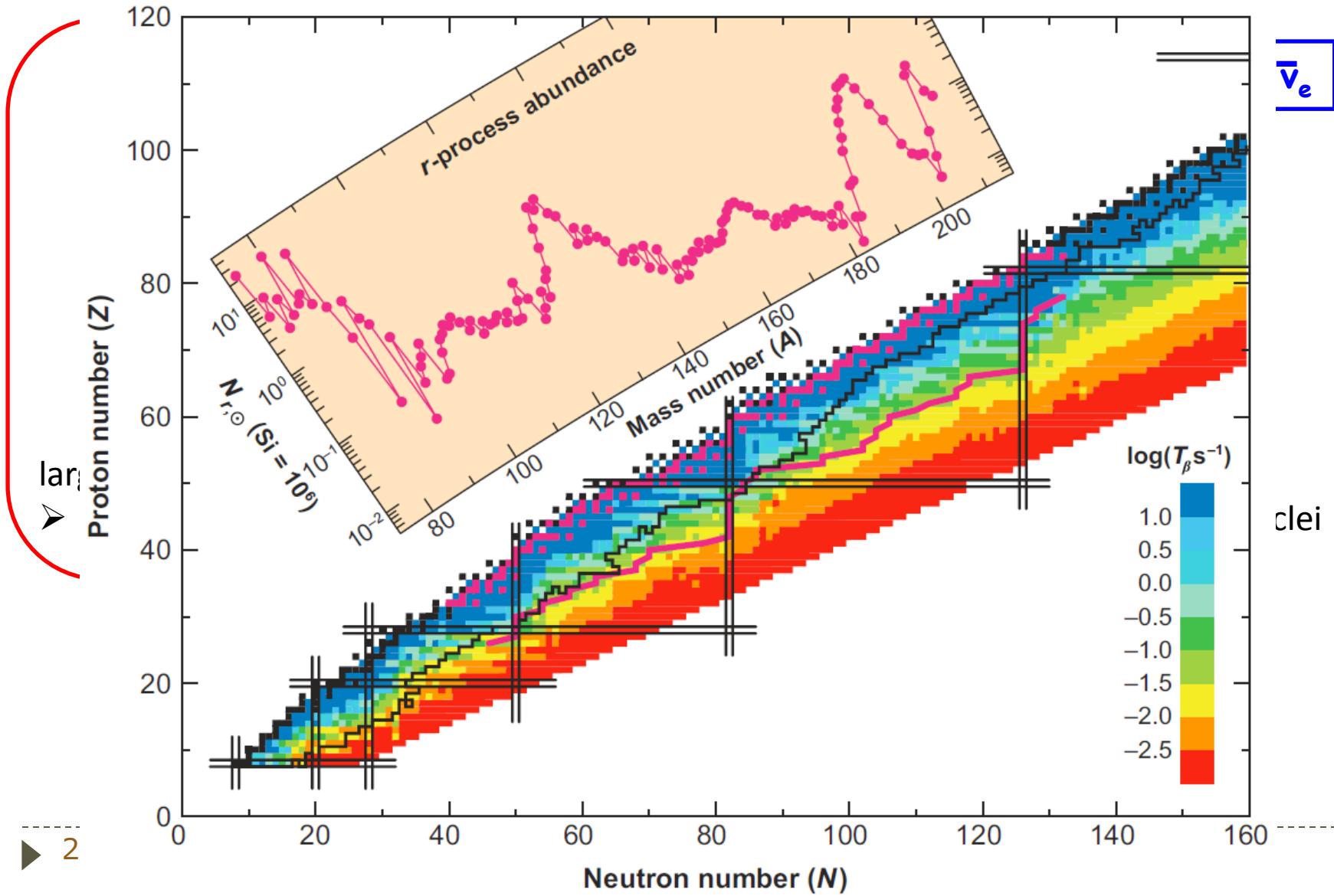
コンパクト天体連星合体の数値相対論 シミュレーション –r-process の起源を探る –

Yuichiro Sekiguchi (YITP)

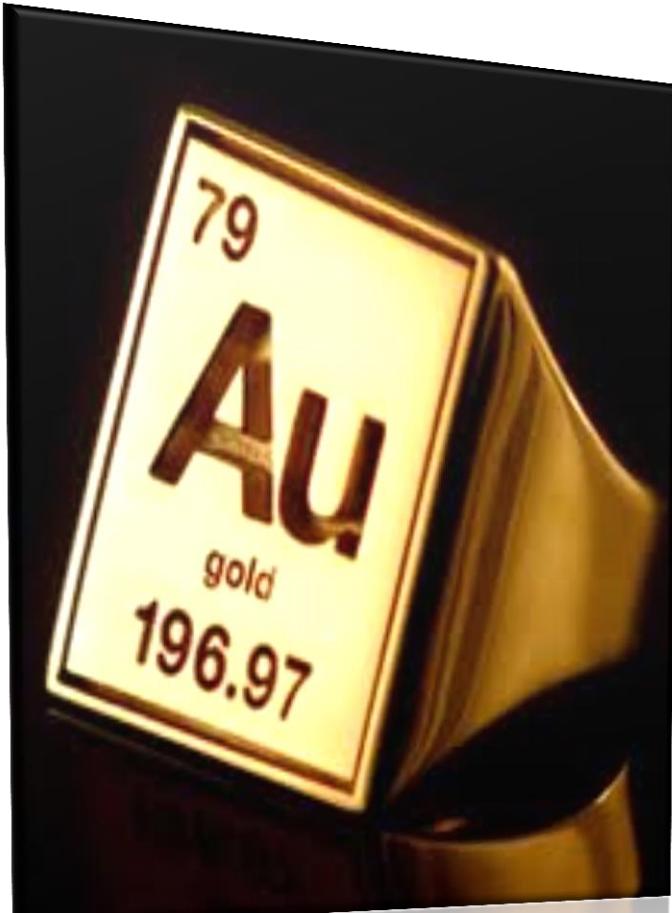
ApJL 789, L39 (2014) / PRD submitted / in prep.

Wanajo (RIKEN), N. Nishimura (Keele Univ.)
K. Kyutoku (UMW), K. Kiuchi, M. Shibata (YITP)

中性子捕獲反応：重元素(金)合成の主経路

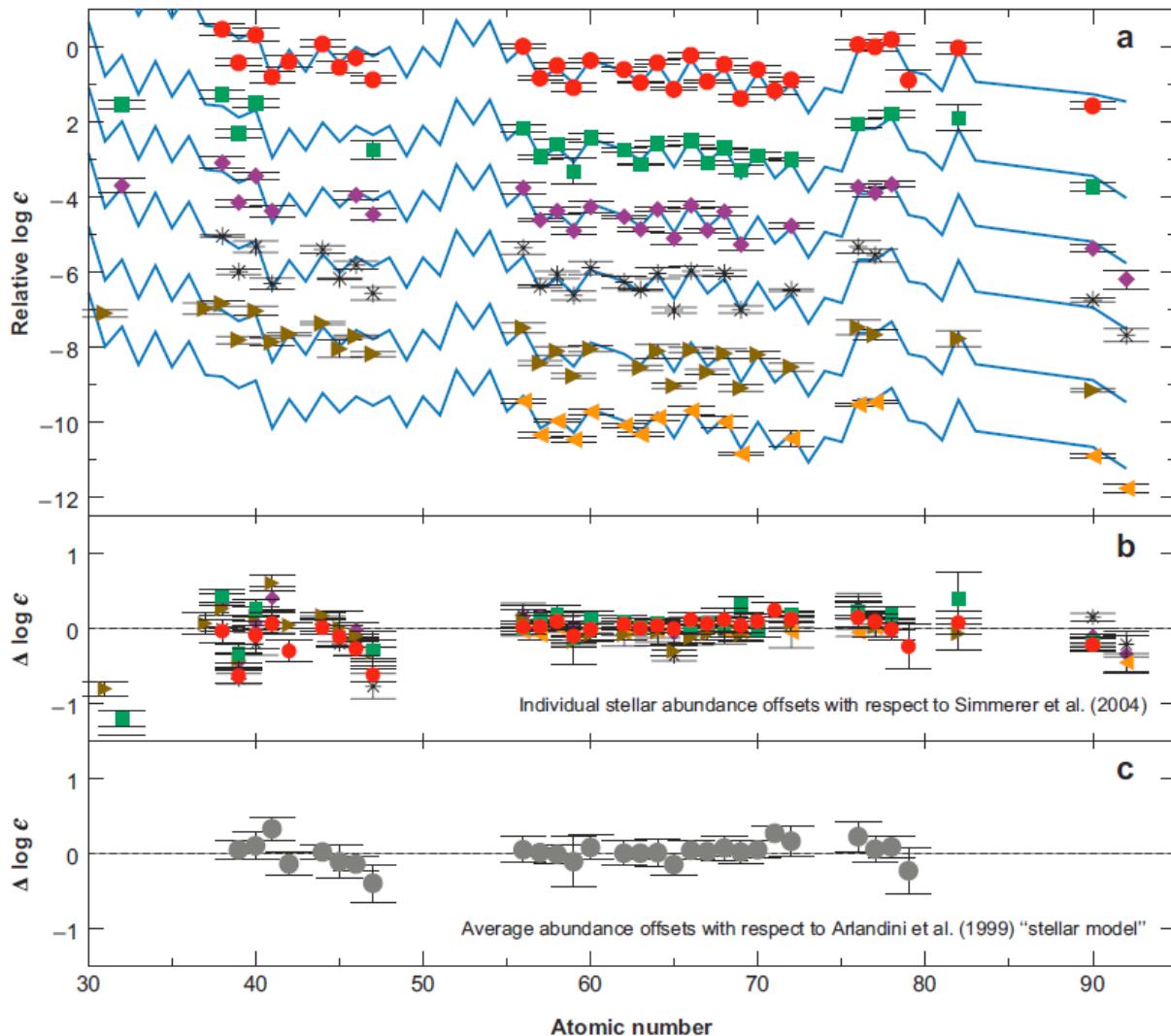


宇宙の鍊金術 : recipe to cook gold



- ▶ Neutron capture : packing neutrons into 'seed' nuclei $n + (Z, N) \Rightarrow (Z, N+1)$
 - ▶ (中性子数)/(種原子核数) 大 が必要
 - ▶ $A(\text{gold}) - A(\text{seed}) \sim 100$
- ▶ Low electron(proton) fraction Y_e
 - ▶ 充分な数の中性子の存在
- ▶ Higher entropy per baryon (爆発現象)
 - ▶ He/種原子核の生成を抑制
- ▶ Short expansion time (爆発現象)
 - ▶ He/種原子核の生成を抑制

the r-process cite の示す ‘Universality’



- ▶ 金属欠乏性の観測
 - ▶ 1-2回程度の金属汚染を経験
- ▶ どの星の組成も太陽組成とよい一致 ($Z=40^{\sim}100$, $A>90$)
- ▶ 太陽組成は異なる組成パターンの重ね合わせの結果ではなく、各 r-process event が universal に太陽組成に近いことを示唆

r-process 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高くない
- ▶ ニュートリノ加熱機構ではニュートリノを充分に吸収する必要があるが、その場合には低Ye環境を保てない
- ▶ Universality はさらに困難

▶ 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)

【宇宙やバイ】金やウランは中性子星の合体で作られた可能性が高いことが明らかに

1 : グロリア(やわらか銀行)@転載は禁止:2014/07/18(金) 17:30:46.62 ID:4TzMbwm0 2PLT(13001) ポイント特典



金やウランは中性子星の合体で作られた可能性が高いことが明らかに
2014年7月18日 14:53

スーパーコンピューターによる中性子星合体の数値シミュレーション。左は2つの中性子星の合体の瞬間。右は合体から8ミリ秒後の様子を表す。上は物質の密度の対数値(ρ/ρ_0)、下は物質中の中性子の割合(%)を表す。右下の黄色からオレンジの渦状部分で金やウランなど、青から水色の部分で銀やレアースなどがつくられる(理化学研究所の発表資料より)
<http://www.zaikei.co.jp/files/general/2014071814540380big.jpg>
観測による太陽系重元素組成と数値計算による重元素組成を比較した図。元素分布を質量数の閏数として表す。
例えば、銀は107、109、レアースは約140~180、ブチナ(192、194~196、198、金は197、ウランは235、238など)(理化学研究所の発表資料より)
<http://www.zaikei.co.jp/files/general/2014071814560280big.jpg>

理化学研究所と京都大学による研究グループは、金やウランなどの重い元素は、中性子星が合体した時に作られた可能性が高いことを明らかにした。

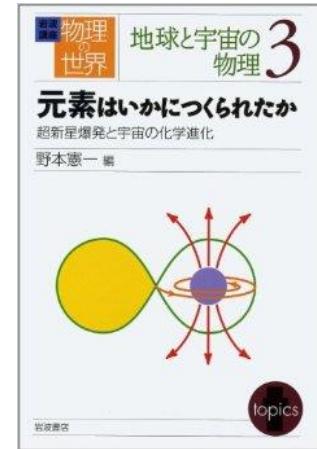
ビッグバンによって宇宙ができる当初は、水素やヘリウムだけの軽い元素しか存在していなかったが、星の中の核融合反応によってさらに重い元素が作られた。しかし、鉄よりも重い元素はどのようにしてできたのかが解明されていなかった。

今回の研究では、スーパーコンピューターによって2つの中性子星が合体するシミュレーションをあこなったところ、合体の際に放出される物質には中性子が多く含まれているため、鉄よりも重い元素が次々と作られることが明らかになった。さらに、シミュレーションによつて得られた重元素組成は太陽系での実際の観測値を再現しており、中性子星合体によって金やウランが作られた可能性が高いと言える結果となつた。

今後は、岐阜県の神岡銅山に建設中の「KAGRA(かぐら)」をはじめとする次世代重力波検出装置によって、1年に数回発生する中性子星合体を直接観測することが期待されている。

なお、この内容は米国科学雑誌「The Astrophysical Journal Letters」に掲載された。

<http://www.zaikei.co.jp/article/20140718/204899.html>

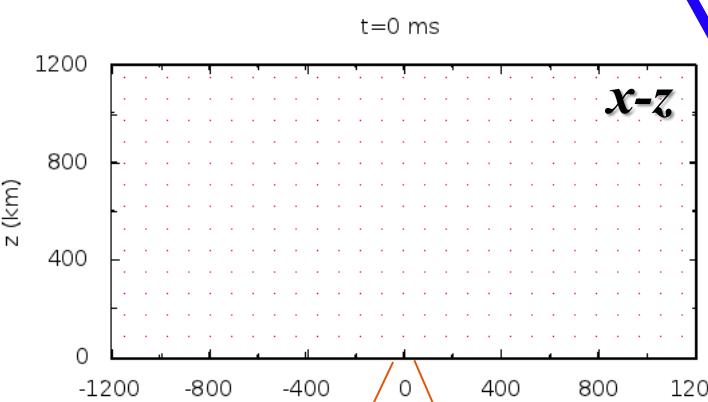


連星中性子星の合体と r-process 元素合成

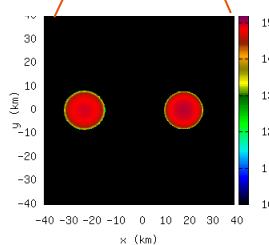
- ▶ Mass ejection from BNS merger : two components

▶ 潮汐破壊に伴う成分

- ▶ 基本的に β -平衡にある冷たい中性子星物質 \Rightarrow 低温, **low Ye**



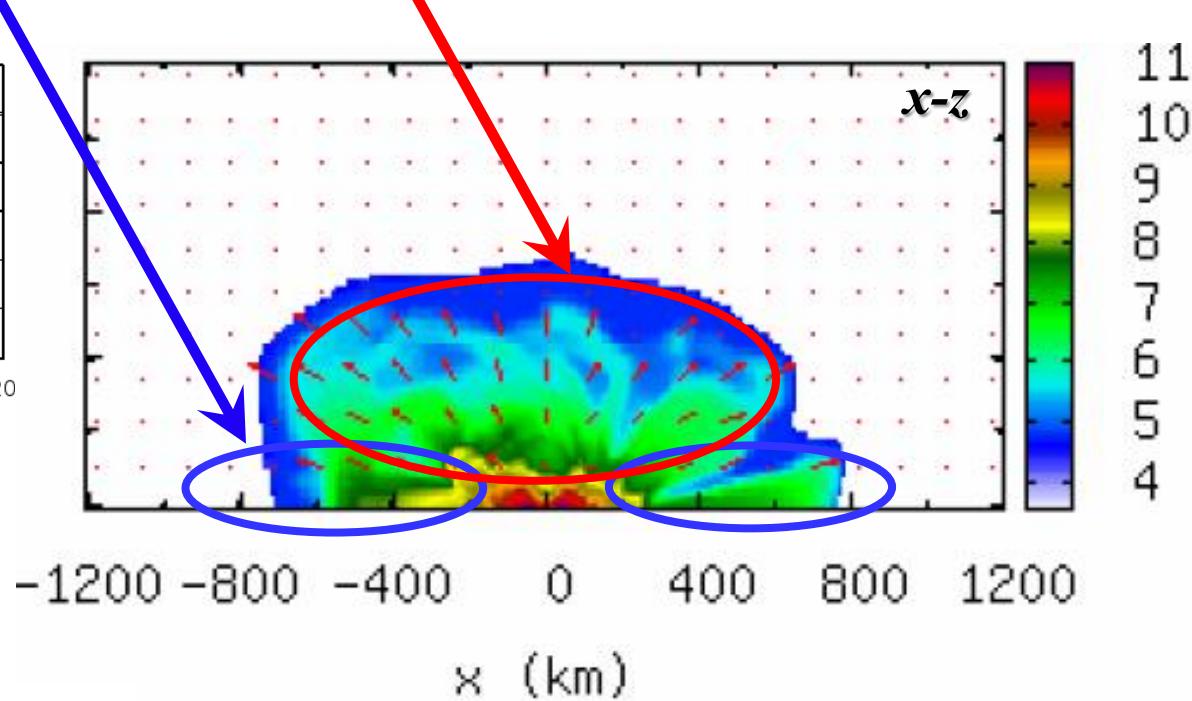
animation by
Hotokezaka



6

▶ 衝撃波加熱による成分

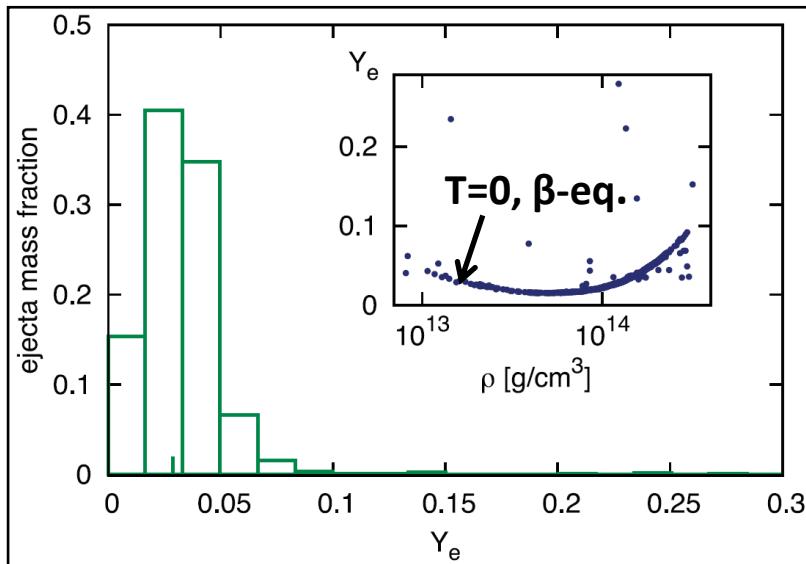
- ▶ 高温、弱い相互作用によって Ye が上昇
(中性子過剰を抑える方向 $Ye \uparrow$)



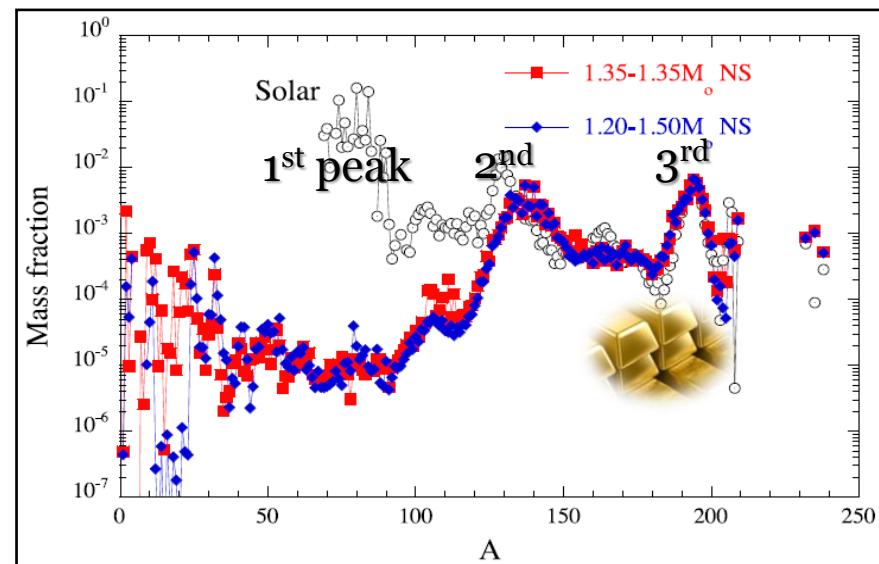
連星中性子星合体: too neutron-rich ?

► 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 2nd ($A \sim 130$; $N=82$) and 3rd ($A \sim 195$; $N=126$) 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



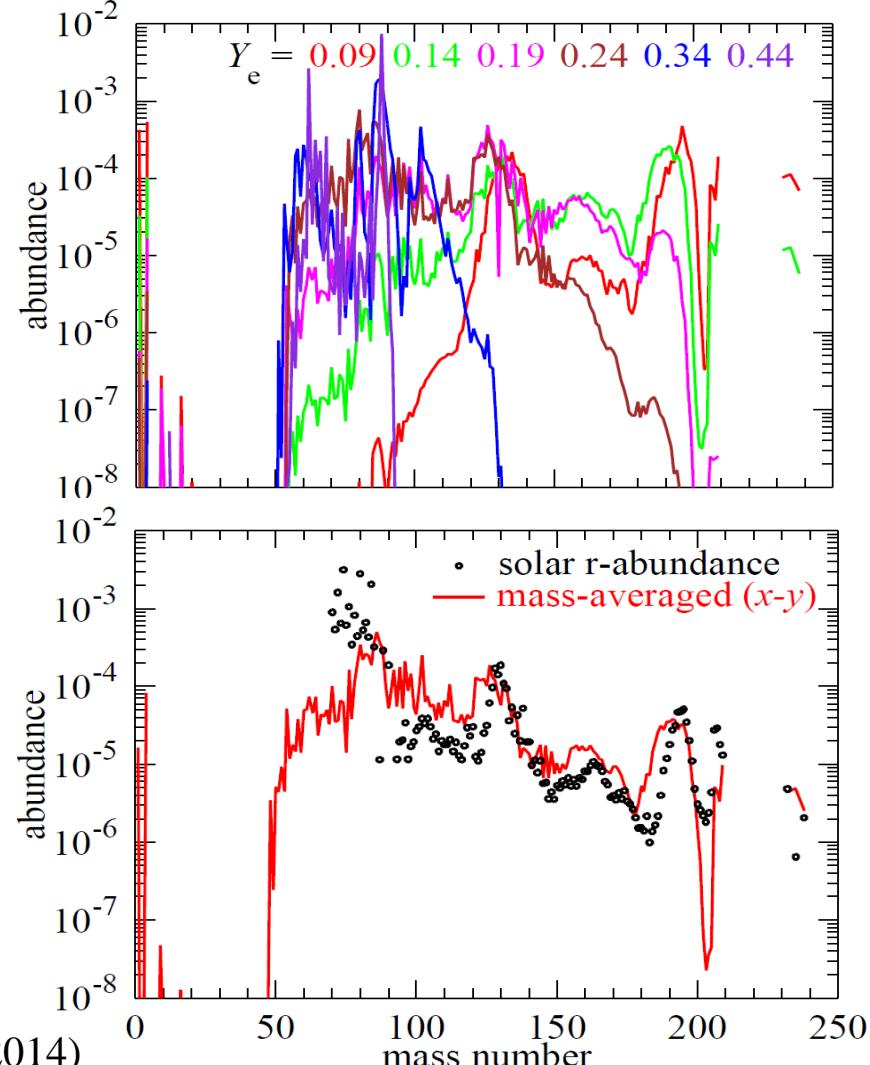
Korobkin et al. (2012) MNRAS 426 1940



Goriely et al. (2011) ApJL 738 32

中性子捕獲反応は ^{76}Ye 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、
单一のr過程イベントそれが
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
 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？



Wanajo, Sekiguchi et al. (2014)

CfCA um 2014 2015/01/20-21

計算コードの概要

- ▶ 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 :
 - E-captures: thermal unblocking, weak magnetism; NSE rate
 - Iso-energy scattering : recoil, Coulomb, finite size
 - Electron scattering in an approximate manner
 - E± annihilation, plasmon decay, bremsstrahlung
 - Diffusion rate (Rosswog & Liebendoerfer 2004)
 - ▶ レプトン数保存の計算

2014年度の成果(1)：状態方程式依存性

Sekiguchi et al. PRD submitted

- ▶ 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

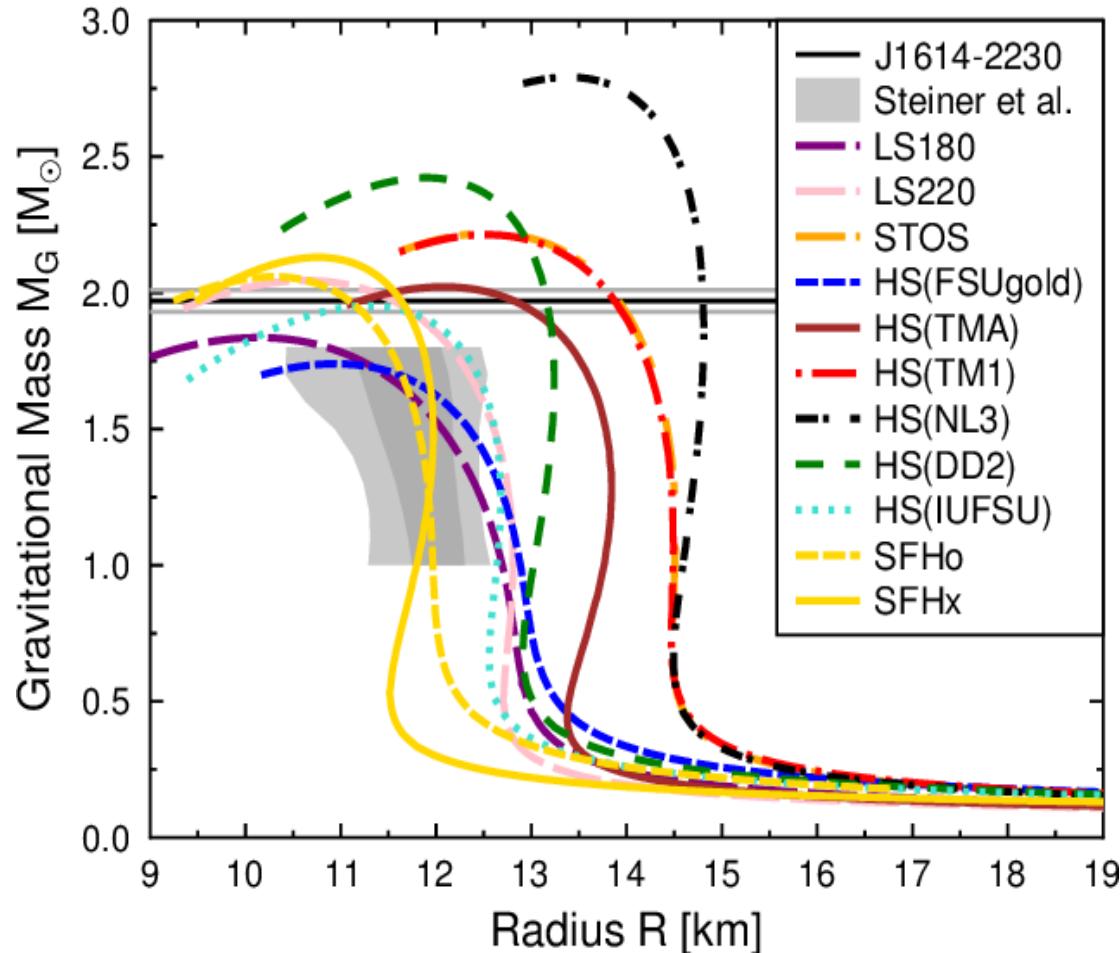
- ▶ Thanks to M. Hempel

- ▶ 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ィント

- ▶ Ejecta の総量・性質の状態方程式への依存性を明らかにする

半径: 小
↓

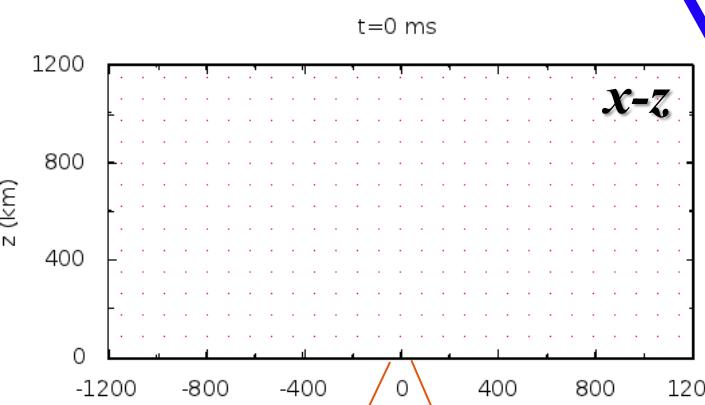


連星中性子星の合体と r-process 元素合成

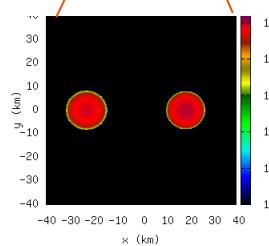
- ▶ Mass ejection from BNS merger : two components

▶ 潮汐破壊に伴う成分

- ▶ 基本的に β -平衡にある冷たい中性子星物質 \Rightarrow 低温, **low Ye**



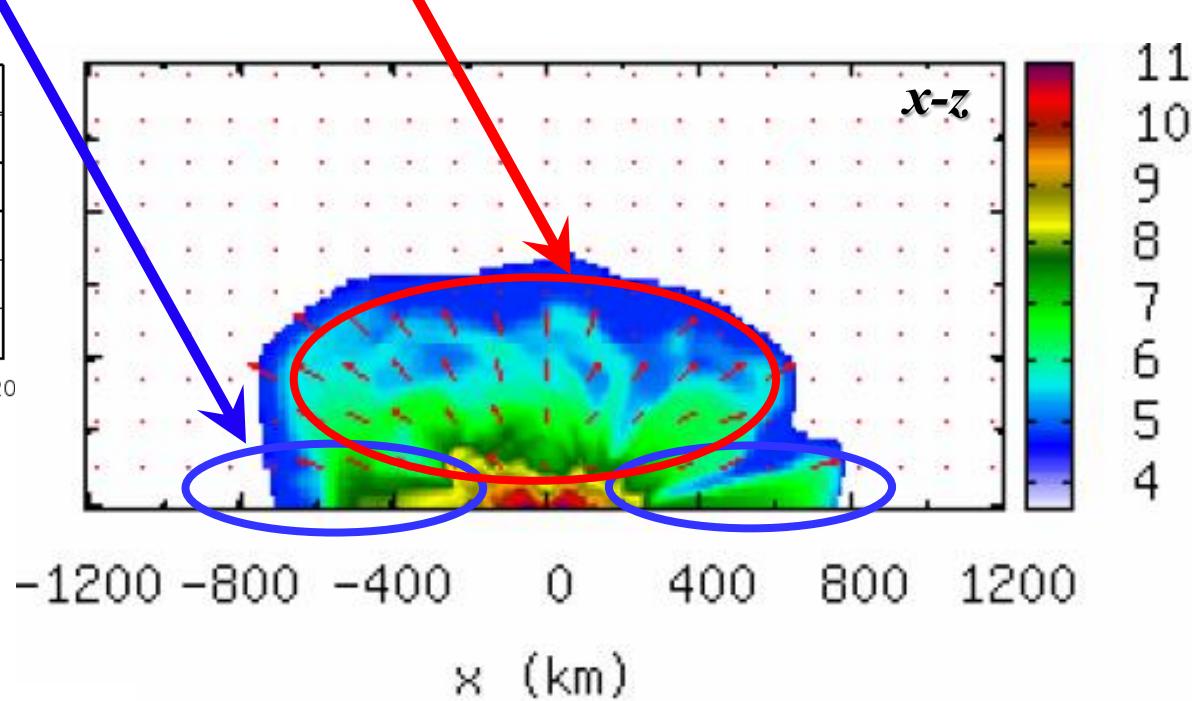
animation by
Hotokezaka



11

▶ 衝撃波加熱による成分

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



質量放出の状態方程式(EOS)依存性

▶ ‘硬いEOS’

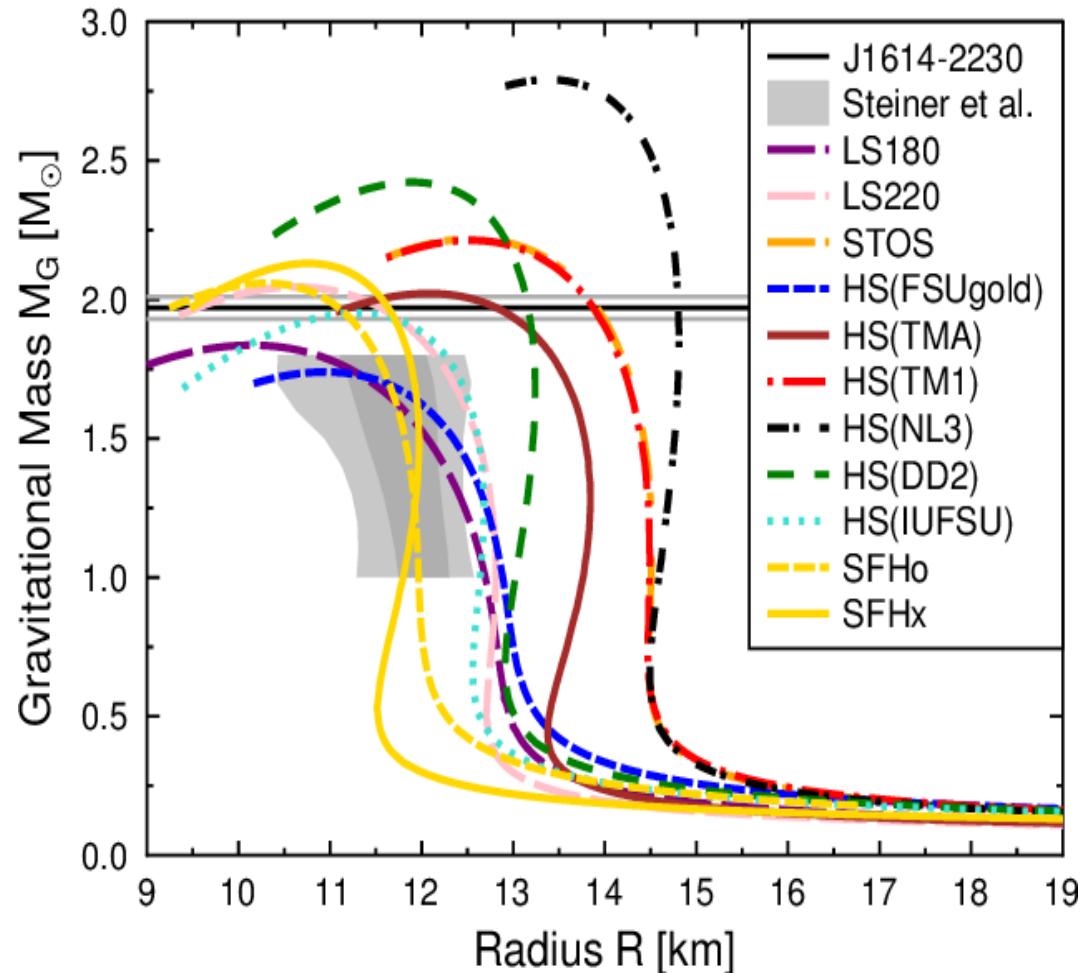
- ▶ TM1
- ▶ 中性子星半径:大
- ▶ 潮汐破壊成分 dominant
- ▶ 冷たい中性子星物質 dominant (low Ye)

▶ ‘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

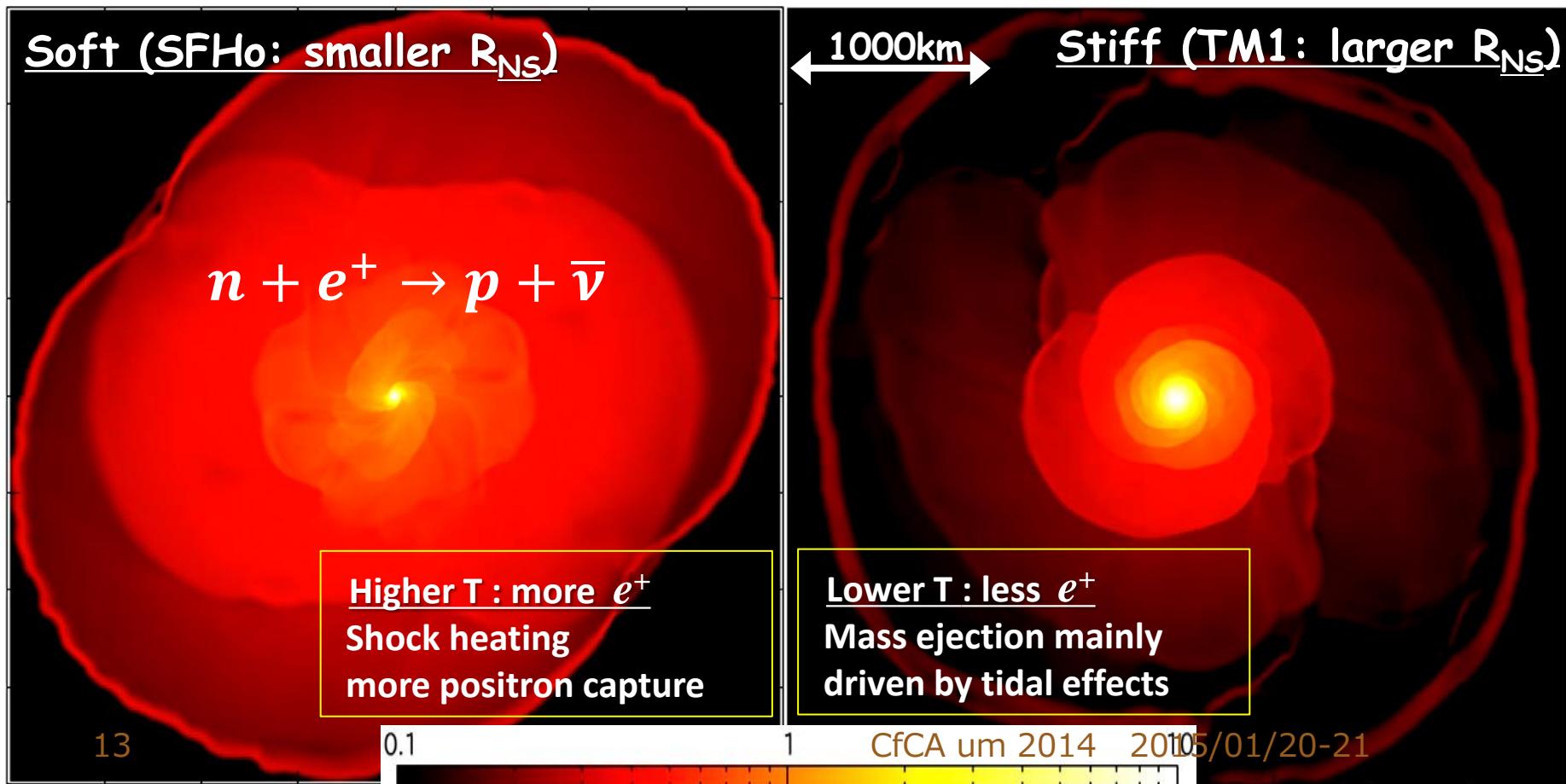
▶ ‘中間のEOS’

- ▶ DD2



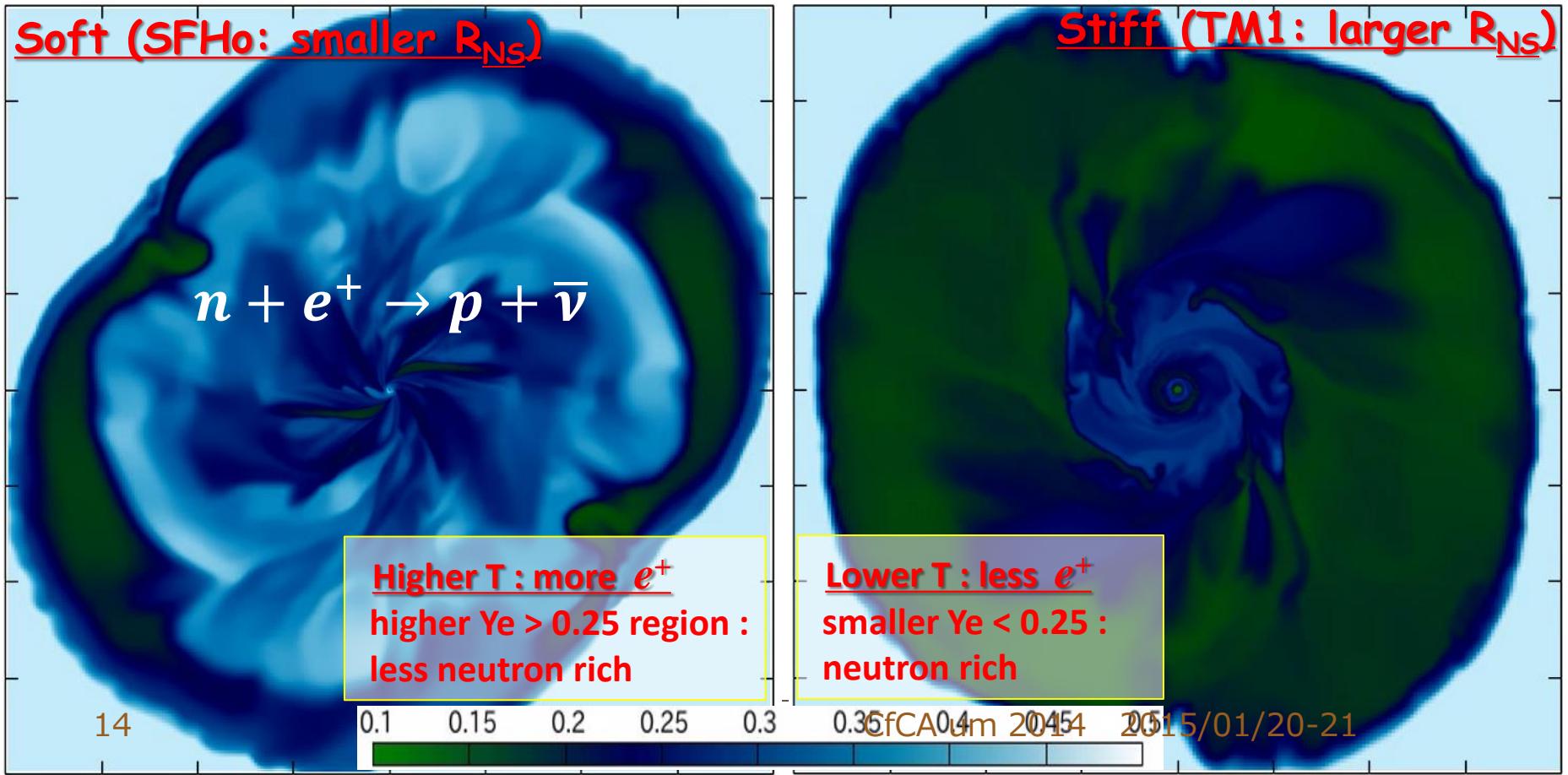
Soft(SFH_o) vs. Stiff(TM1): Ejecta temperature

- ▶ Soft (SFH_o): temperature of unbound ejecta is higher (as 1MeV) due to the shock heating, and produce copious positrons
- ▶ Stiff (TM1): temperature is much lower

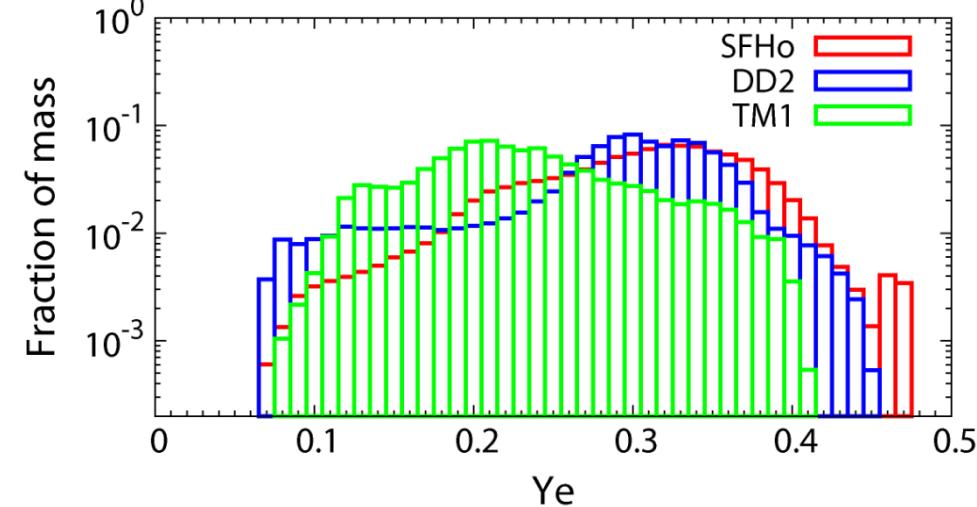
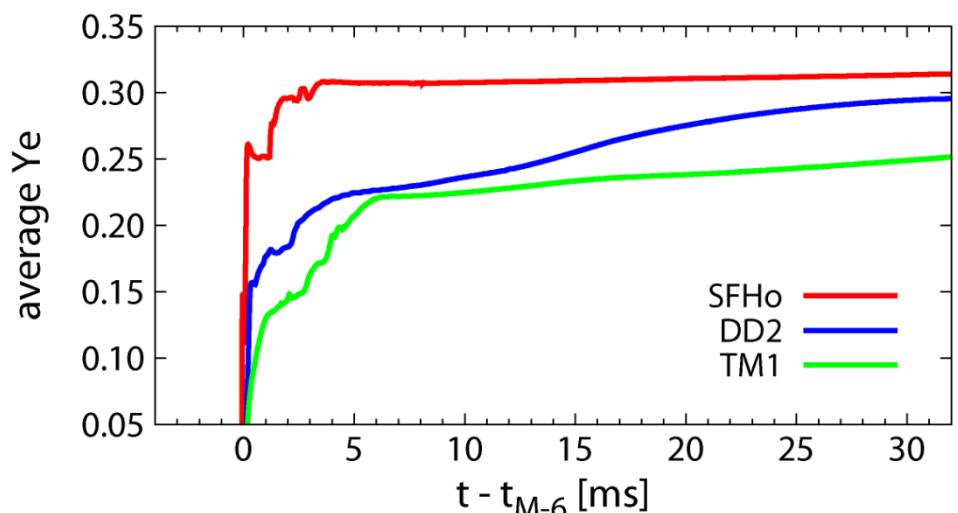
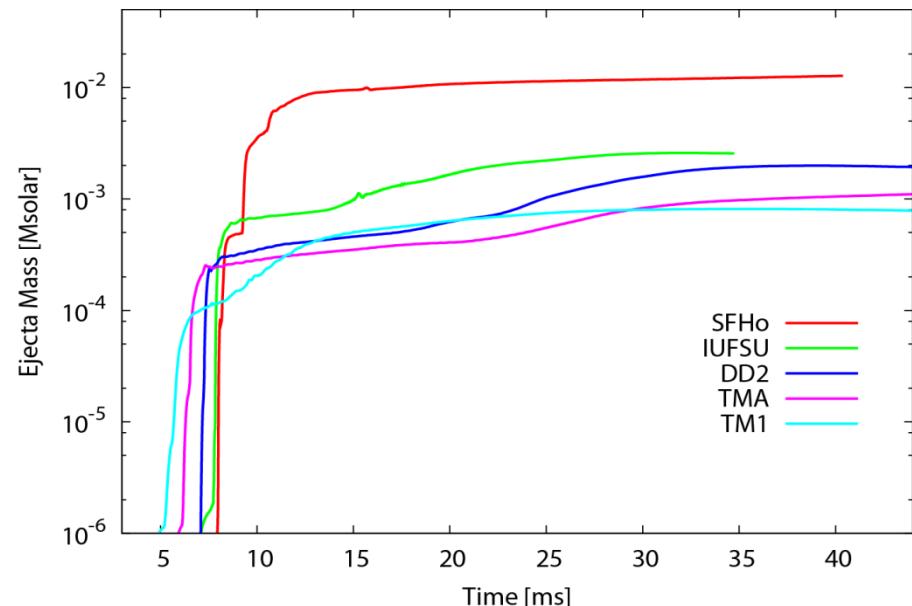


Soft(SFH_o) vs. Stiff(TM1): Ejecta temperature

- ▶ Soft (SFHo): In the shocked regions, Ye >> 0.2 by weak processes
- ▶ Stiff (TM1): Ye is low as < 0.2 (only strong r-process expected)



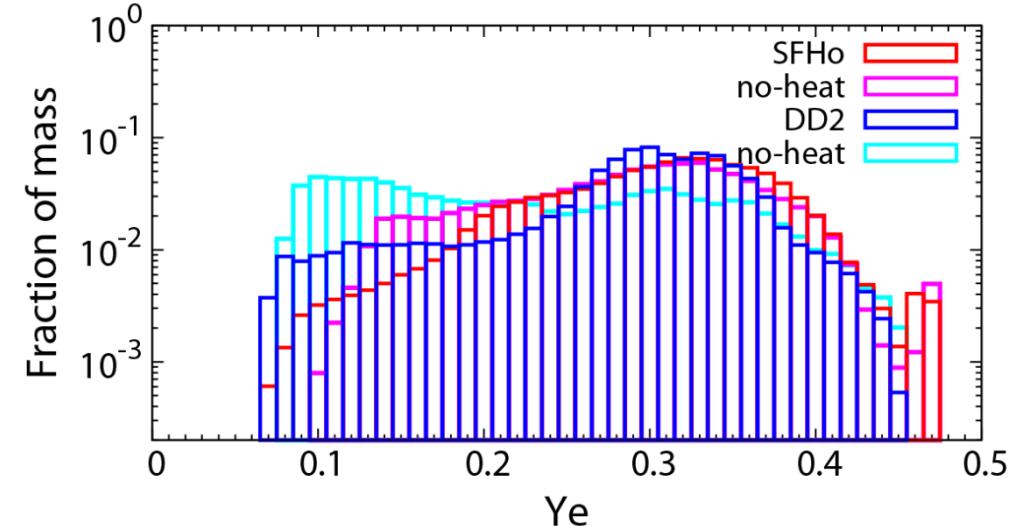
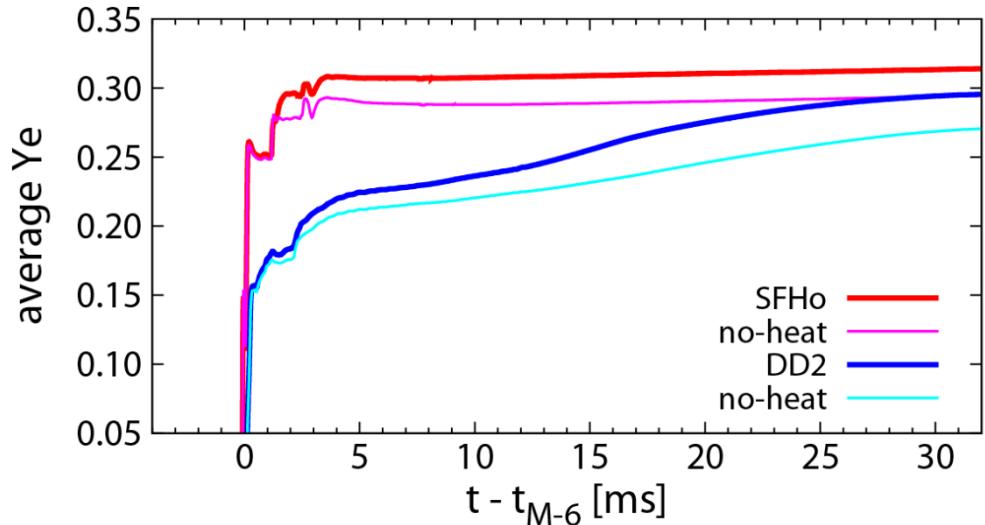
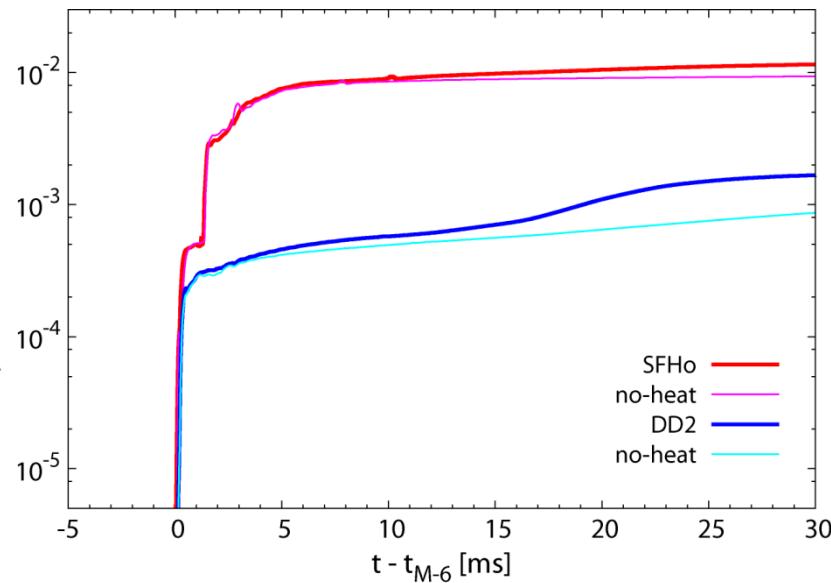
状態方程式依存性 : 1.35-1.35 NS-NS



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

2014年の成果(2)：ニュートリノの重要性

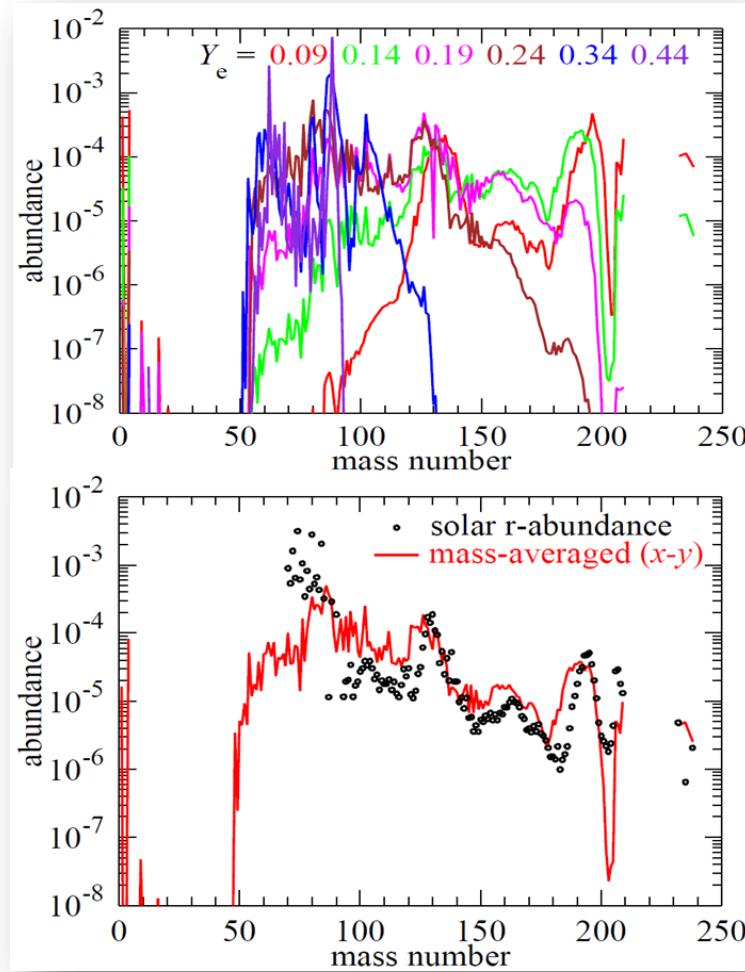
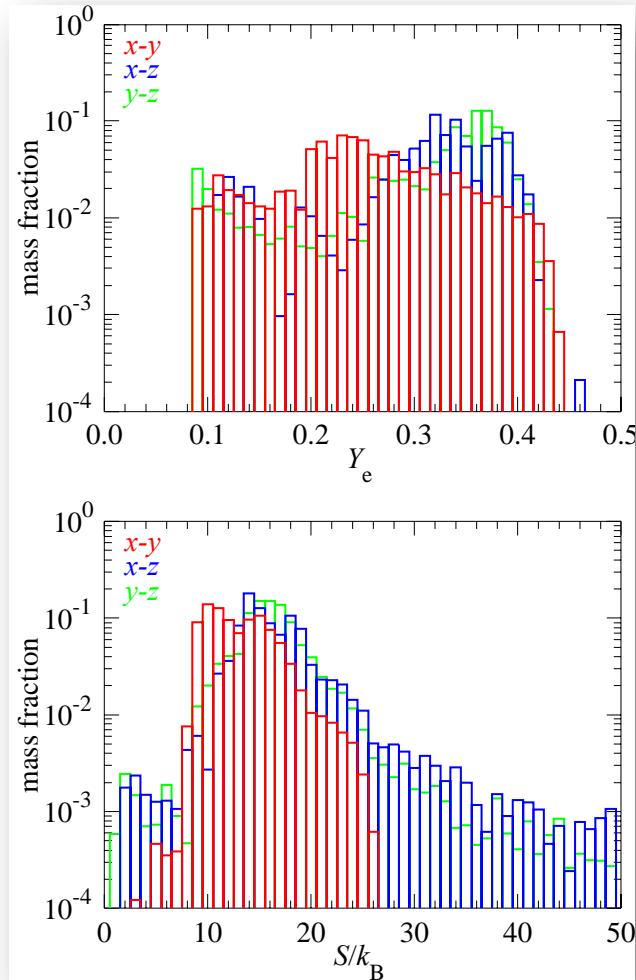
Sekiguchi et al. PRD submitted



- 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)

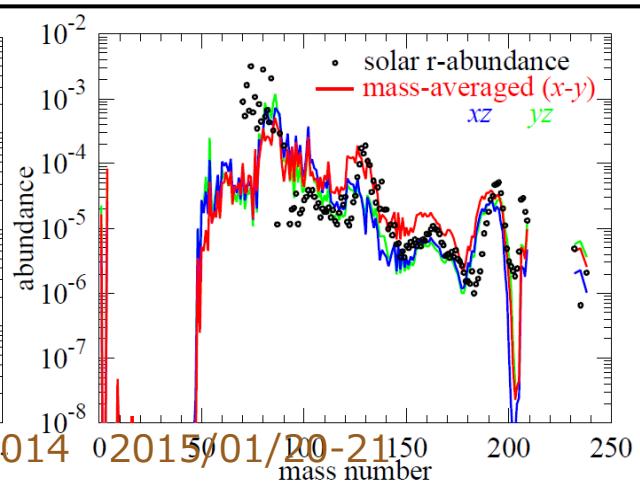
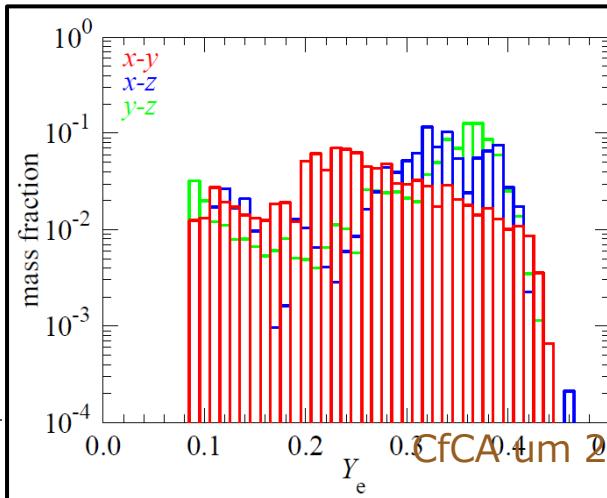
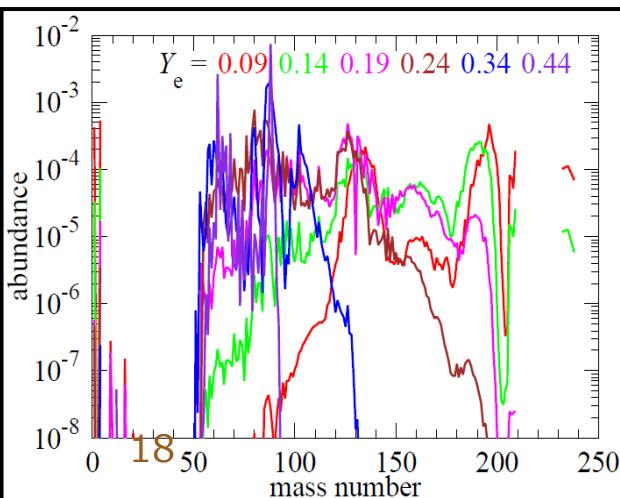
Wanajo. YS et al ApJL (2014)



- 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)

On robustness of common pattern

- ▶ Rough expectation based on limited information currently available
 - ▶ $Y_e < 0.2$ is responsible to the 3rd peak
 - ▶ $Y_e \sim 0.2 - 0.25$ is responsible to the 2nd peak
 - ▶ $Y_e > 0.3$ is responsible to the 1st peak
- ▶ For fixed mass fraction in $Y_e \sim 0.1$ (fixed 3rd peak)
 - ▶ Factor of ~ 5 difference in $Y_e > 0.3$ does not change 1st peak very much
⇒ enhancement (from flat distribution) in $Y_e > 0.3$ would not be serious
 - ▶ Factor of ~ 10 difference in $Y_e \sim 0.2$ reduces 2nd peak considerably
⇒ mass ratio between $Y_e \sim 0.1$ and 0.2 may be important for 2nd and 3rd peaks

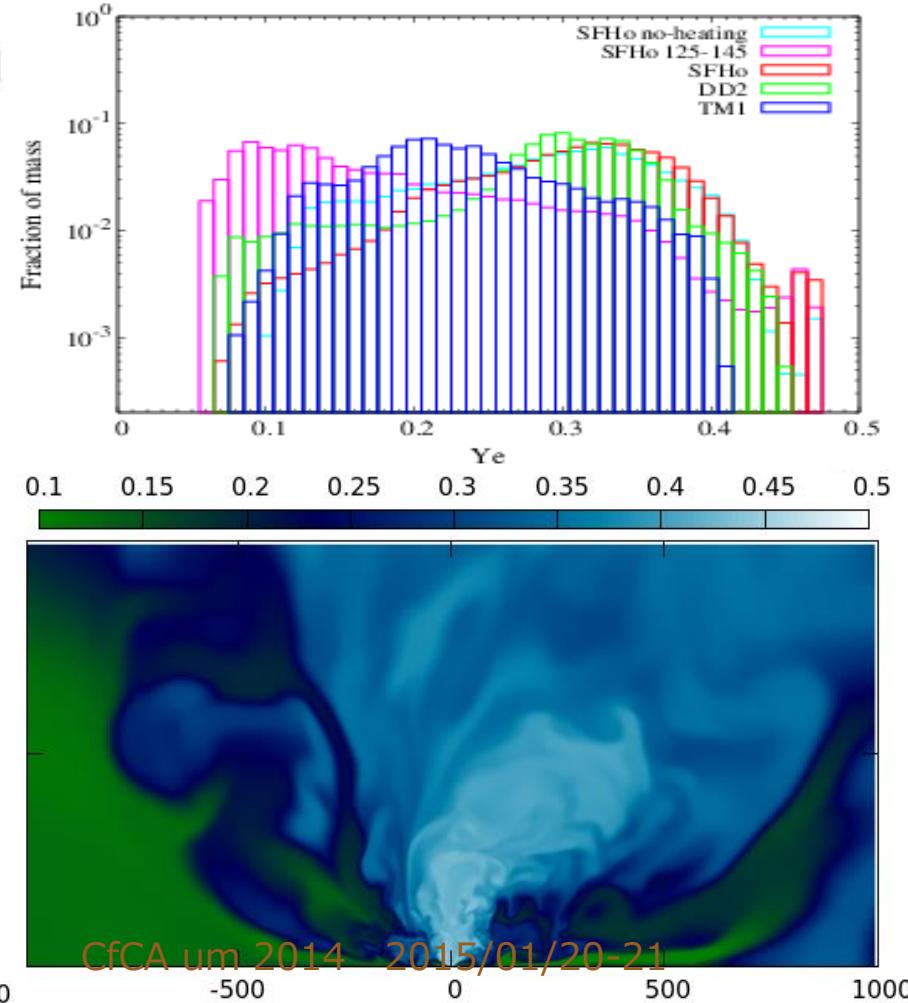
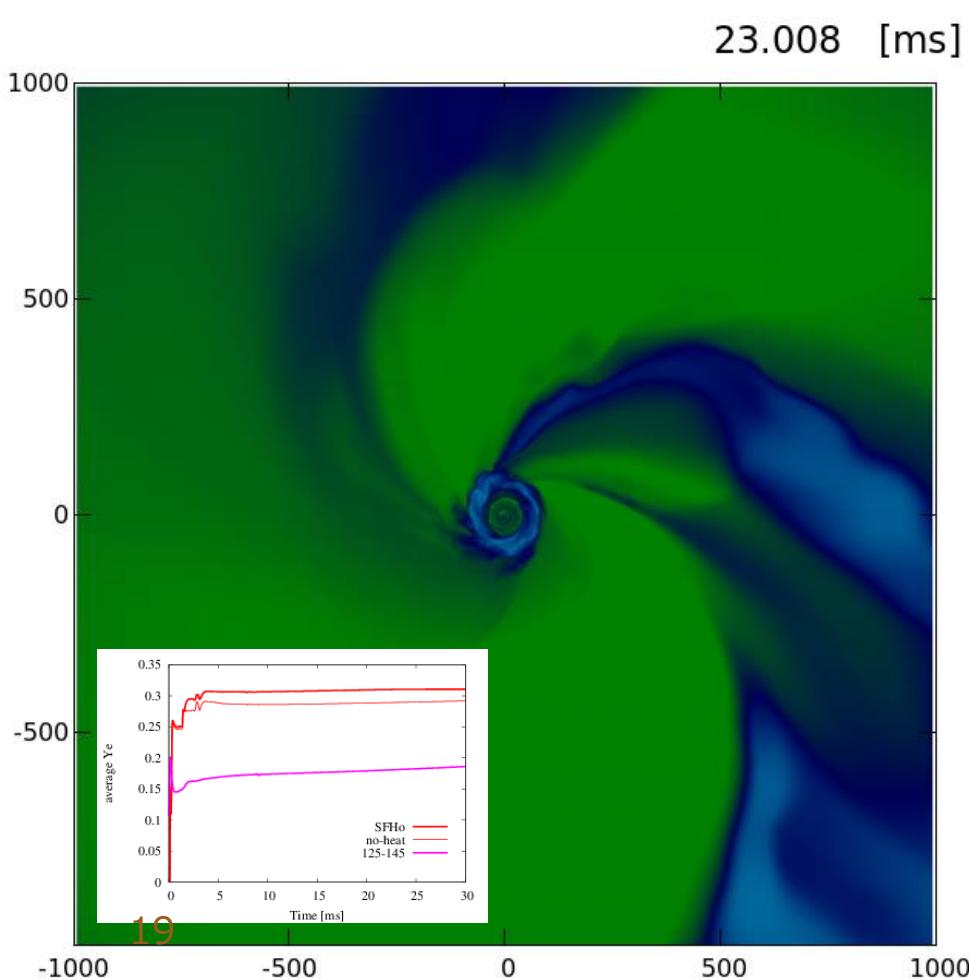


2014年の成果(3):連星パラメータ依存性

Sekiguchi et al. in prep.

SFHo1.25-1.45

- ▶ Orbital plane : Tidal effects play a role, ejecta is neutron rich
- ▶ Meridian plane : shock + neutrinos play roles, ejecta less neutron rich



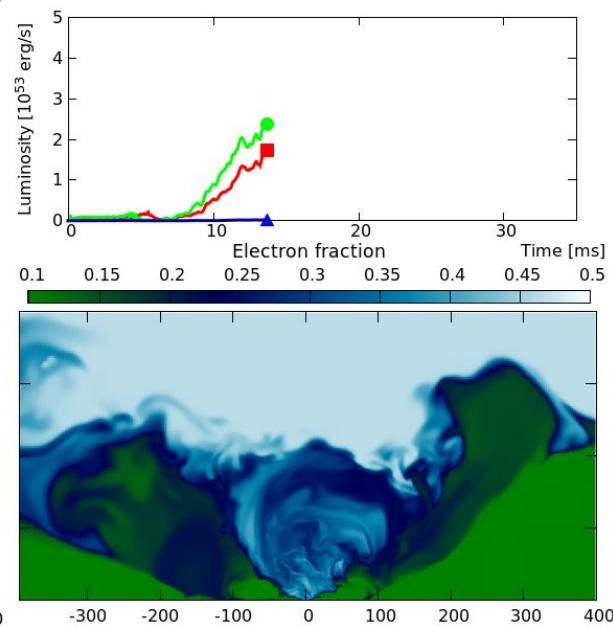
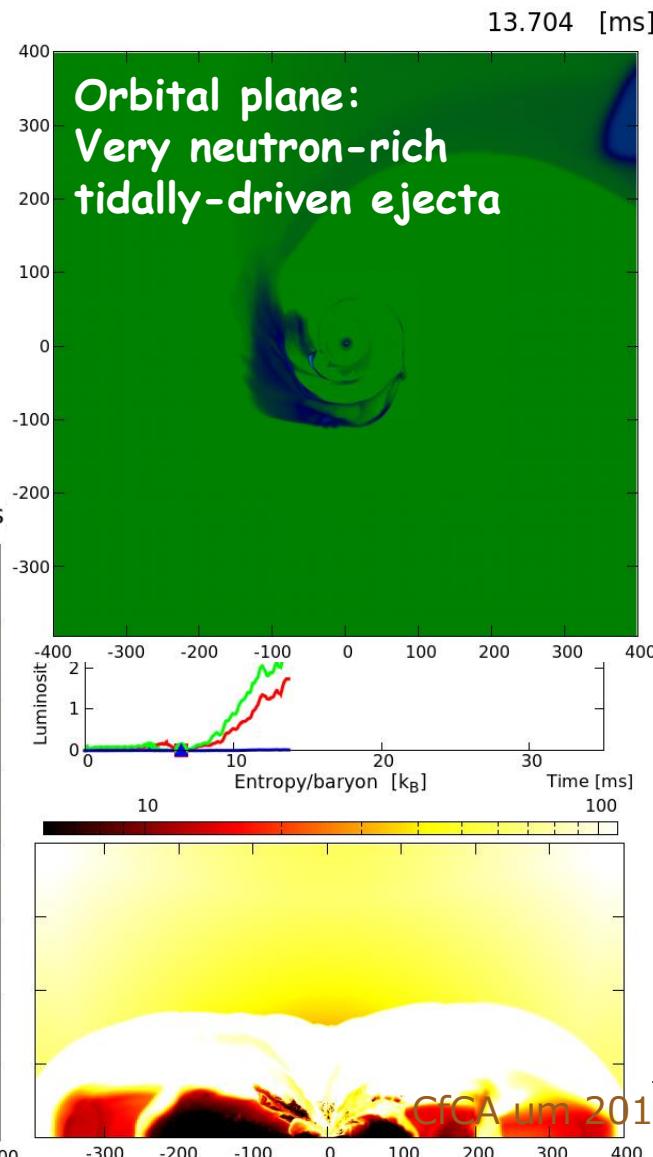
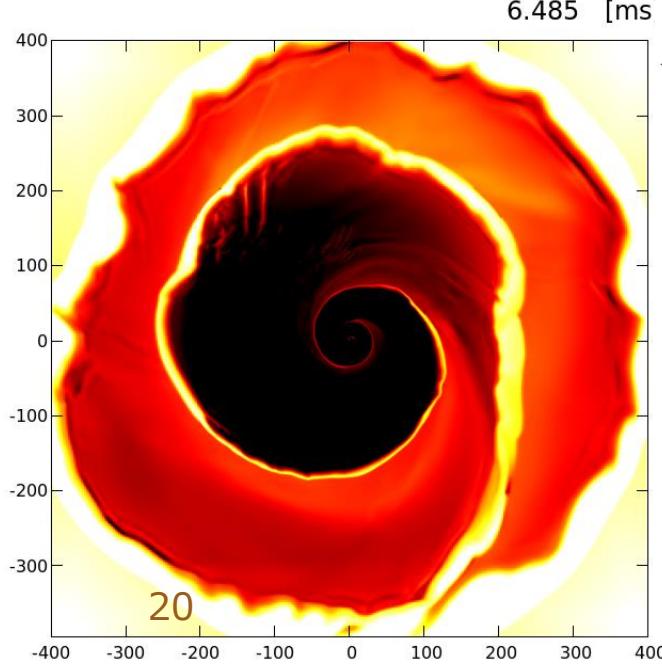
2014年の成果(4) : now ongoing

BH-NS merger : test simulation (mass ratio 3:1, spin 0.75)

NS is tidally disrupted

Shocks are generated
when spiral arms
interacts

Entropy of tidally
disrupted NS remains low



Pole region: Neutrino-
driven winds with less
neutron rich materials

New discovery !
(GR+neutrinos essential)

2014 2015/01/20-21

まとめ

- ▶ 連星中性子星合体
 - ▶ Universality の再現: Wanajo, YS, et al. ApJL (2014)
 - ▶ 状態方程式依存性: Sekiguchi et al. PRD submitted
 - ▶ ニュートリノの重要性: Sekiguchi et al. PRD submitted
 - ▶ 連星パラメータ依存性: Sekiguchi et al. in prep.
- ▶ ブラックホール・中性子星連星合体
 - ▶ Simulations on going