

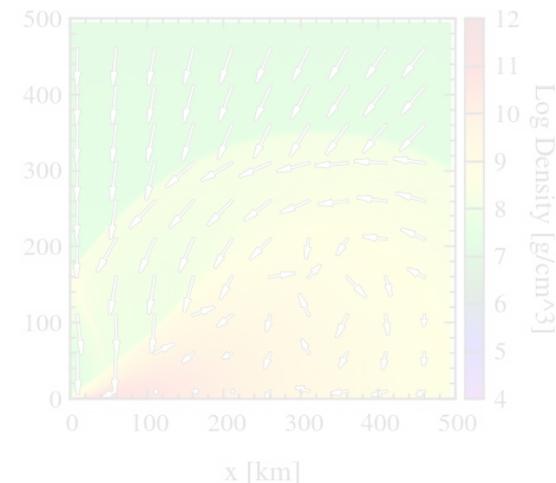
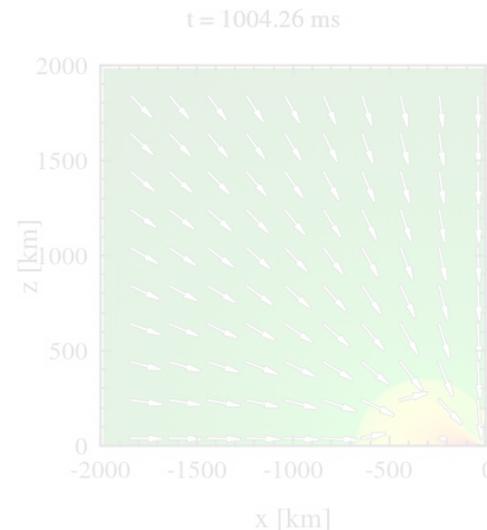
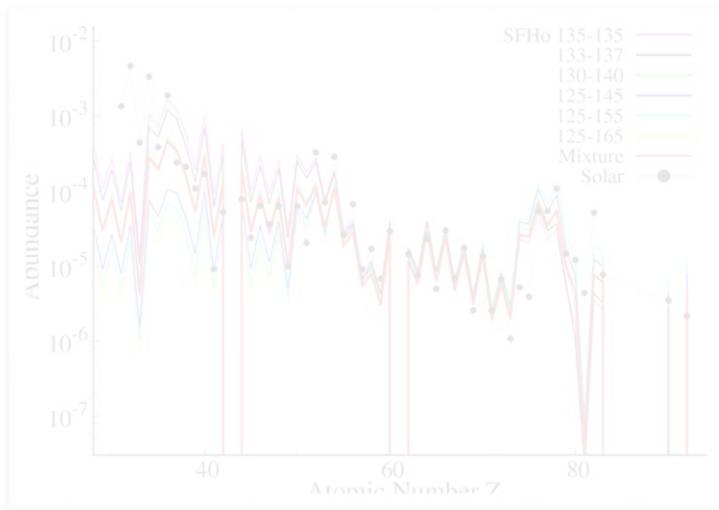
素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム

数値相対論輻射流体コードによる シミュレーションの進捗状況

関口 雄一郎 (東邦大学)

今年度の実施状況

- ▶ 連星中性子星合体時の動的質量放出における元素合成パターン
 - ▶ GW170817 に合致する状態方程式(SFH₀, DD2)を採用した前年度までの結果の利用
 - ▶ 元素合成パターンは金属欠乏星の観測結果と整合的
- ▶ 新しい状態方程式(Togashi et al. 2017)を用いた連星中性子星合体計算
 - ▶ 合体後~5ms でブラックホール形成。合体後~10ms まで計算終了。計算継続中。
 - ▶ 放出質量は現在 0.05 太陽質量程度。高分解能計算も開始。
- ▶ 大質量星(COコア)の重力崩壊の数値相対論的粘性流体シミュレーション
 - ▶ ブラックホール形成後 ~800 ms まで計算終了。計算継続中。
- ▶ Neutrino-radiation-hydrodynamics code の改良



NS-NS合体に関する本研究のターゲット

▶ 重元素(金、プラチナ、ウラン)の起源天体は何か?

- ▶ r 過程(rapid neutron capture) : 中性子過剰環境の必要性
- ▶ **従来は超新星爆発**が候補天体 ⇒ **近年の進展による困難**
 - 従来の naive な期待よりエントロピーが低い (必要な中性子が原子核内に取り込まれてしまう)
 - ニュートリノ加熱機構では中性子過剰環境を保てない (Robert et al. 2011; Wanajo et al. 2011)
- ▶ ⇒ **コンパクト天体連星(NS-NS, NS/BH)合体に注目**が集まっていた

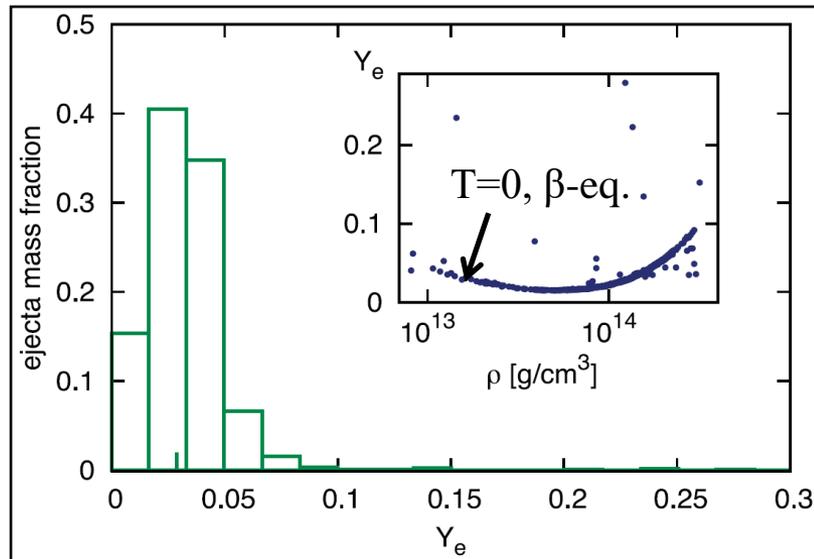
▶ 重力波観測における有望な電磁波対応天体は何か?

- ▶ SGRB jet は細く絞られている可能性が高い
 - SGRB111020A : $\theta_j \sim 3-8^\circ$ (Fong et al. 2012) SGRB051121A : $\theta_j \sim 7^\circ$ (Burrows et al. 2006)
- ▶ 等方的放射は? ⇒ 多くの可能性 (e.g. Metzger & Berger 2012)
 - ▶ 1つの有力な電磁波対応天体が r 過程元素の崩壊熱による可視～赤外放射:
kilonova/macronova (Li & Paczynski 1998, Kulkarni 2005)
 - ▶ GRB 130603B に付随して見つかる! (Berger et al. 2013 Tanvir et al. 2013)
- ▶ **GW170817** における詳細観測

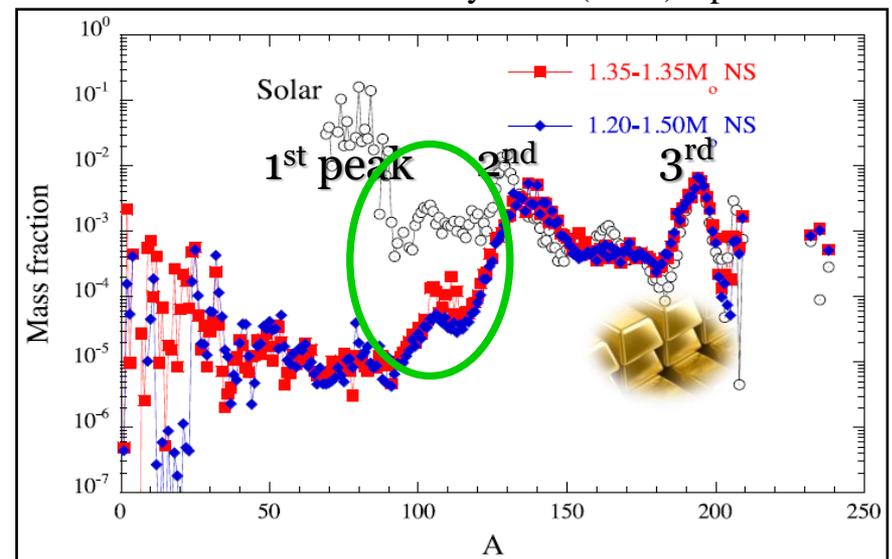
NS-NS合体におけるr過程元素合成：これまでの研究

- ▶ 放出物質の「中性子過剰率 = $1 - Y_e$ 」が重要
 - ▶ Y_e 大 : 中性子過剰率 低 \Rightarrow 非効率な r過程元素合成
 - ▶ Y_e 小 : 中性子過剰率 高 \Rightarrow 効率的な r過程元素合成
- ▶ 2012年頃まで、NS-NS合体からの質量放出は中性子過剰で、太陽組成を再現しないと考えられていた (2nd, 3rd peaks のみ)

Korobkin et al. (2012) MNRAS 426 1940



Goriely et al. (2011) ApJL 738 32



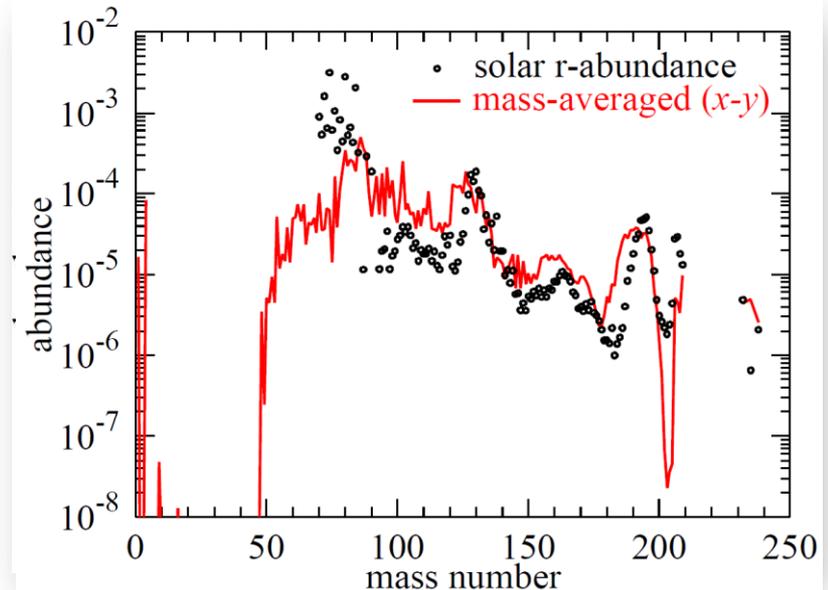
NS-NS合体におけるr過程元素合成：これまでの研究

- ▶ 放出物質の「中性子過剰率 = $1 - Y_e$ 」が重要
 - ▶ Y_e 大：中性子過剰率 低 \Rightarrow 非効率な r過程元素合成
 - ▶ Y_e 小：中性子過剰率 高 \Rightarrow 効率的な r過程元素合成
- ▶ 2012年頃まで、NS-NS合体からの質量放出は中性子過剰で、太陽組成を再現しないと考えられていた (2nd, 3rd peaks のみ)

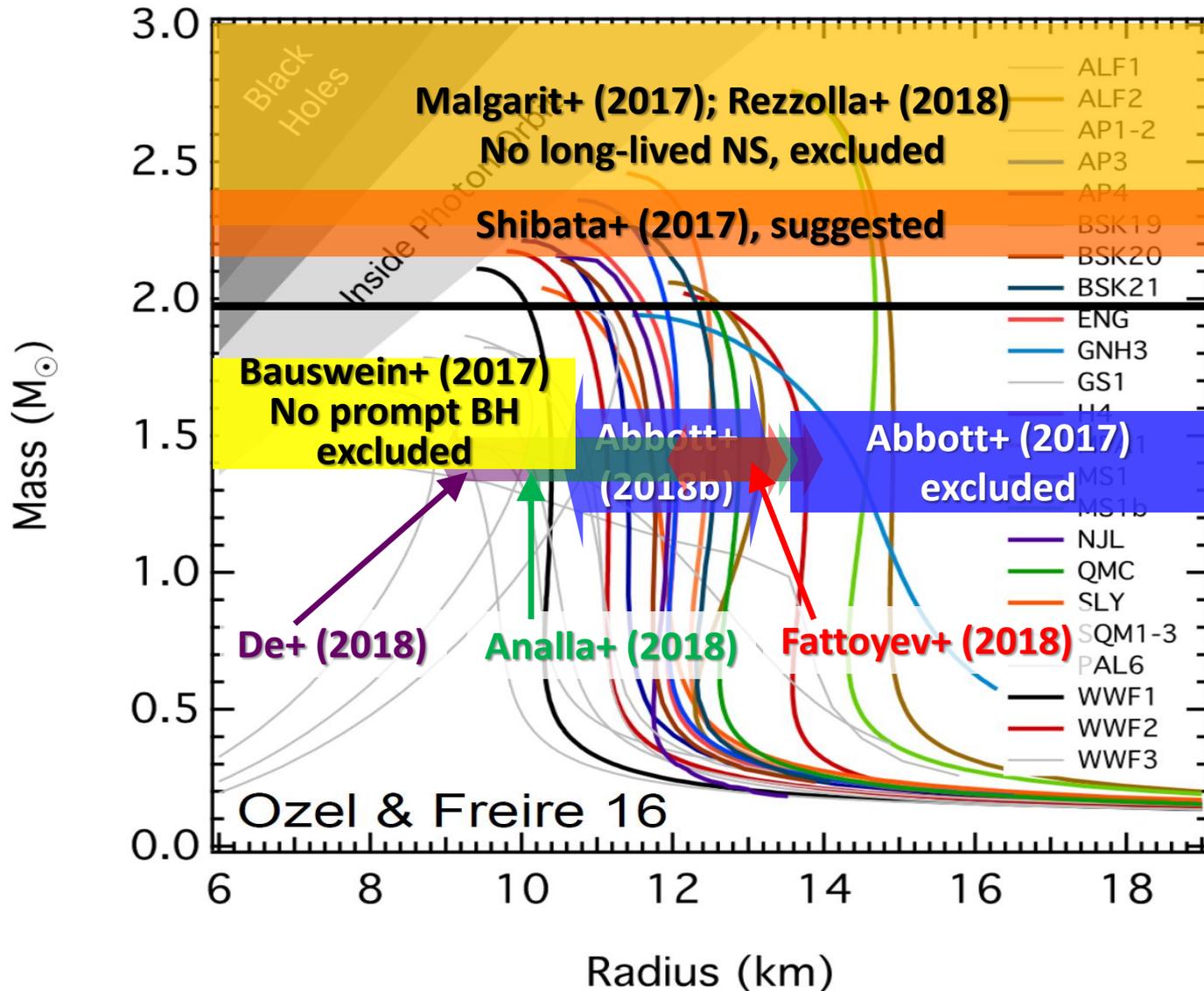
▶ Sekiguchi et al. (2015,2016); Wanajo, YS et al. (2014)

- ▶ 一般相対論 + 弱い相互作用
- ▶ 一般相対論的強重力による高温 (衝撃波加熱) と弱い相互作用によって Y_e が変化
- ▶ $Y_e = 0.1 - 0.5$ までの幅広い分布
- ▶ 太陽組成を再現可能

観測されている連星パルサーの質量分布に基づくと、平均元素組成はどうか？

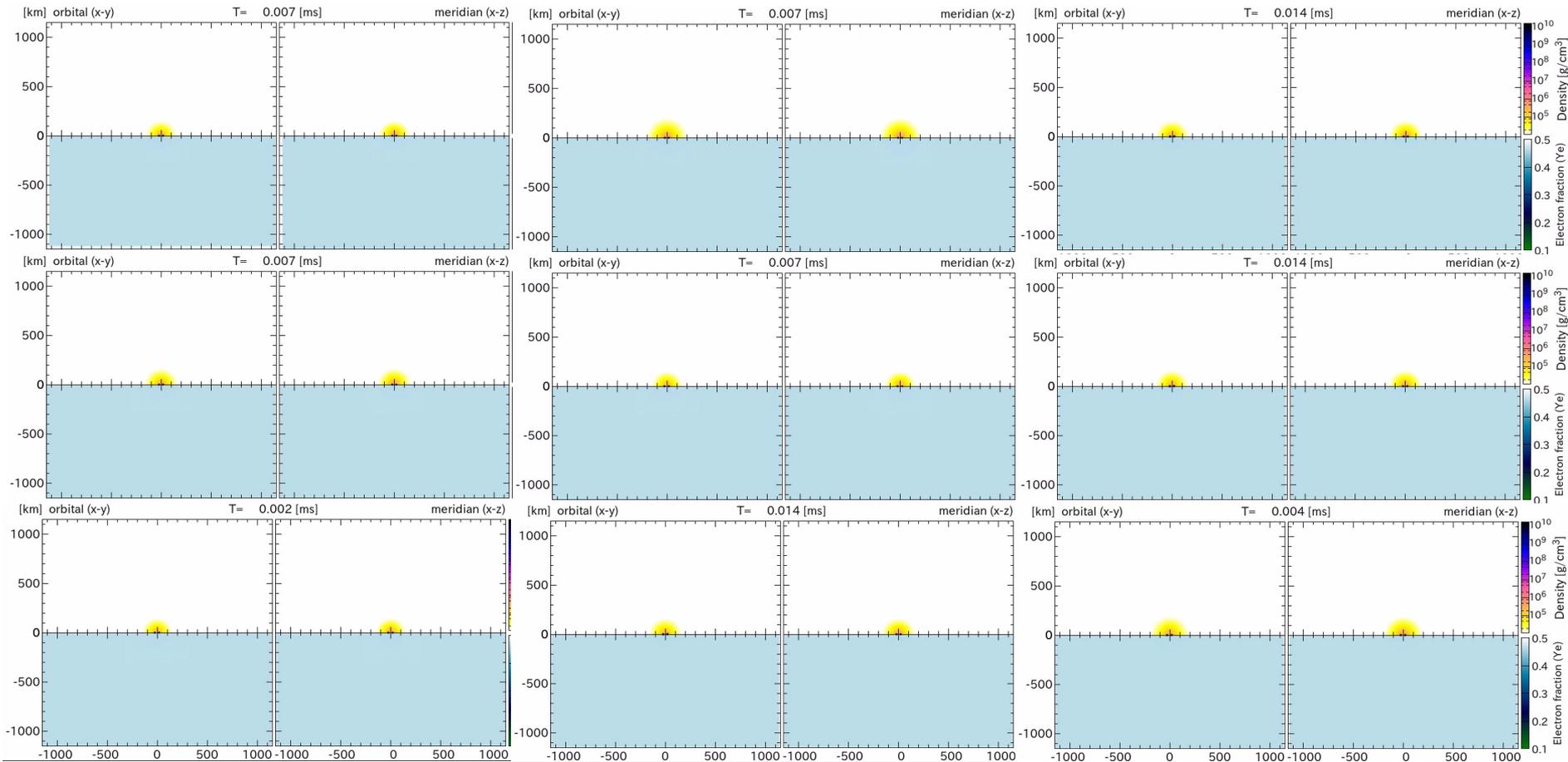


GW170817 による中性子星構造への制限



2つの中性子星状態方程式、質量比0.76-1.0で計算

- ▶ 中性子星状態方程式 **SFHo**($R_{ns}=12\text{km}$), **DD2**($R_{ns}=13\text{km}$)
- ▶ 連星質量比 1.0, 0.97, 0.93, 0.86, 0.81, 0.76 (観測されている連星パルサー)



2つの中性子星状態方程式、質量比0.76-1.0で計算

- ▶ 中性子星状態方程式 **SFHo (Rns=12km)**, **DD2 (Rns=13km)**
- ▶ 連星質量比 1.0, 0.97, 0.93, 0.86, 0.81, 0.76 (観測されている連星パルサー)

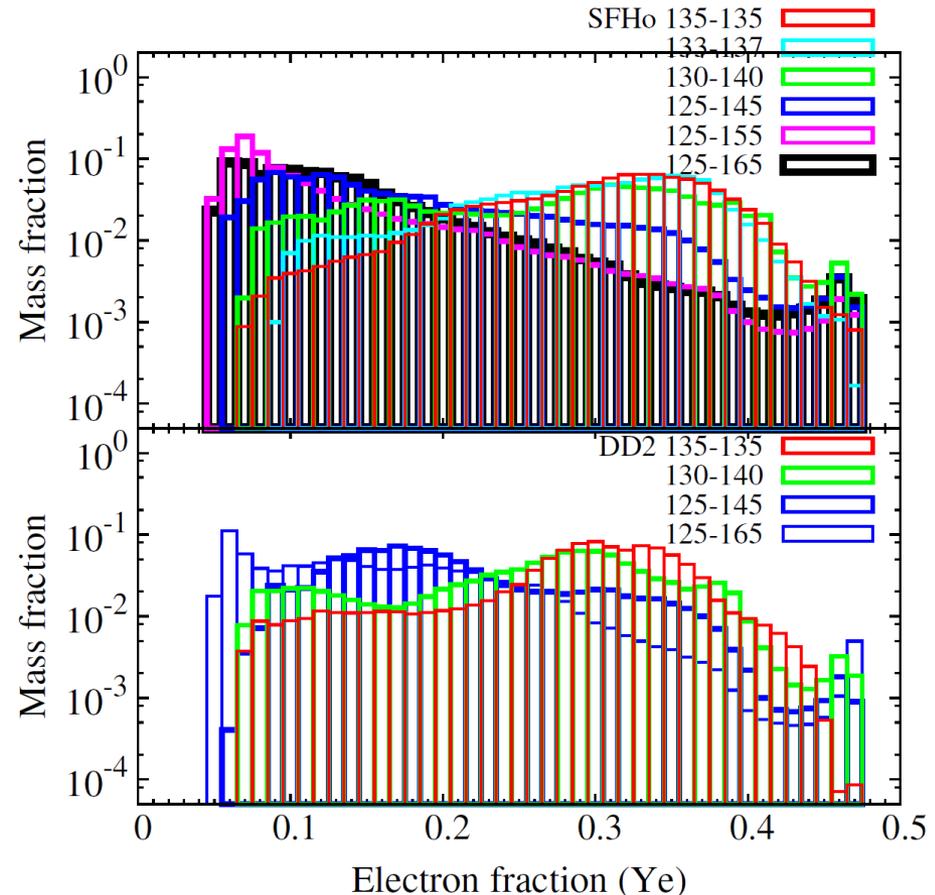
▶ 放出質量

▶ **SFHo : 0.006-0.016**

▶ **DD2 : 0.002-0.008**

- ▶ 放出物質の Y_e は状態方程式、連星質量比によらず **broadな分布**

- ▶ 等質量の場合には衝撃波加熱によって Y_e が大きくなる
- ▶ 非等質量なほど潮汐力による質量放出が効くため低 Y_e が卓越

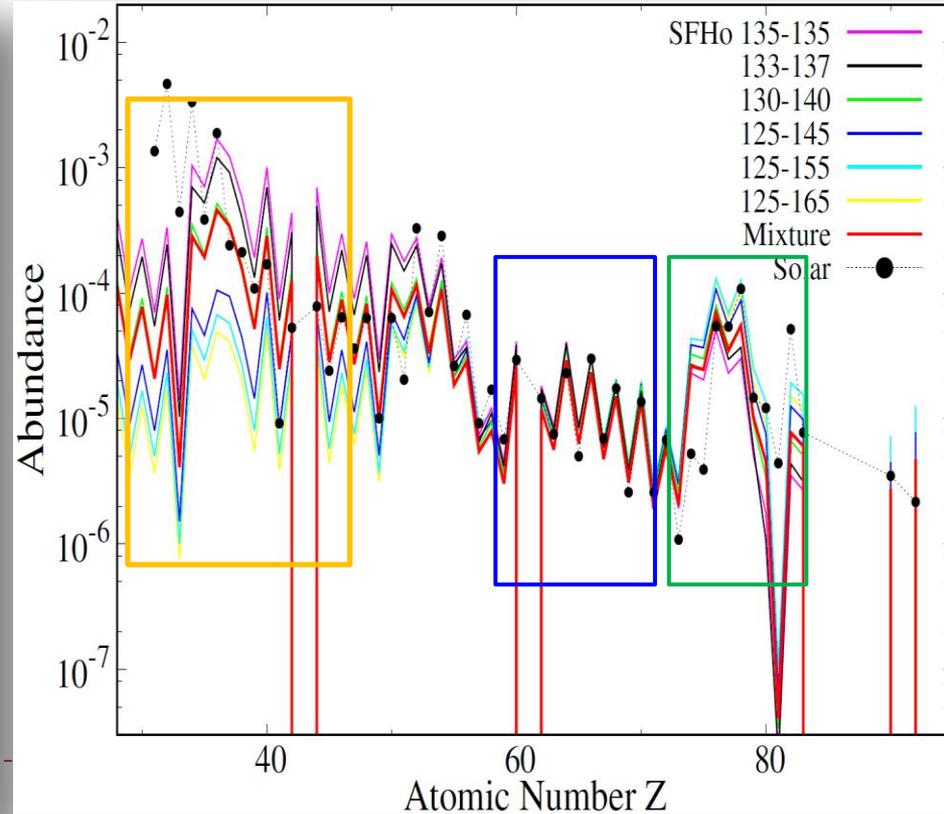
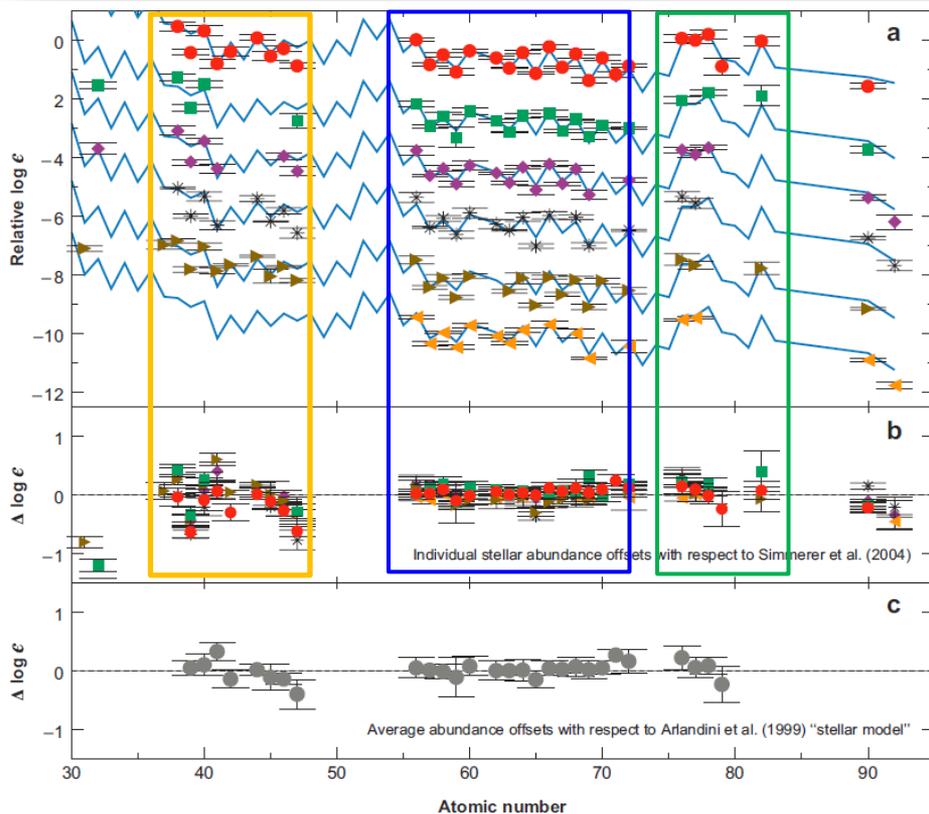


r過程元素組成を連星パルサーの質量比でブレンド

▶ (金属欠乏星による) r過程元素組成の観測結果と整合的

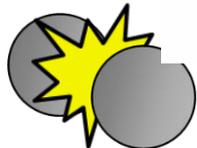
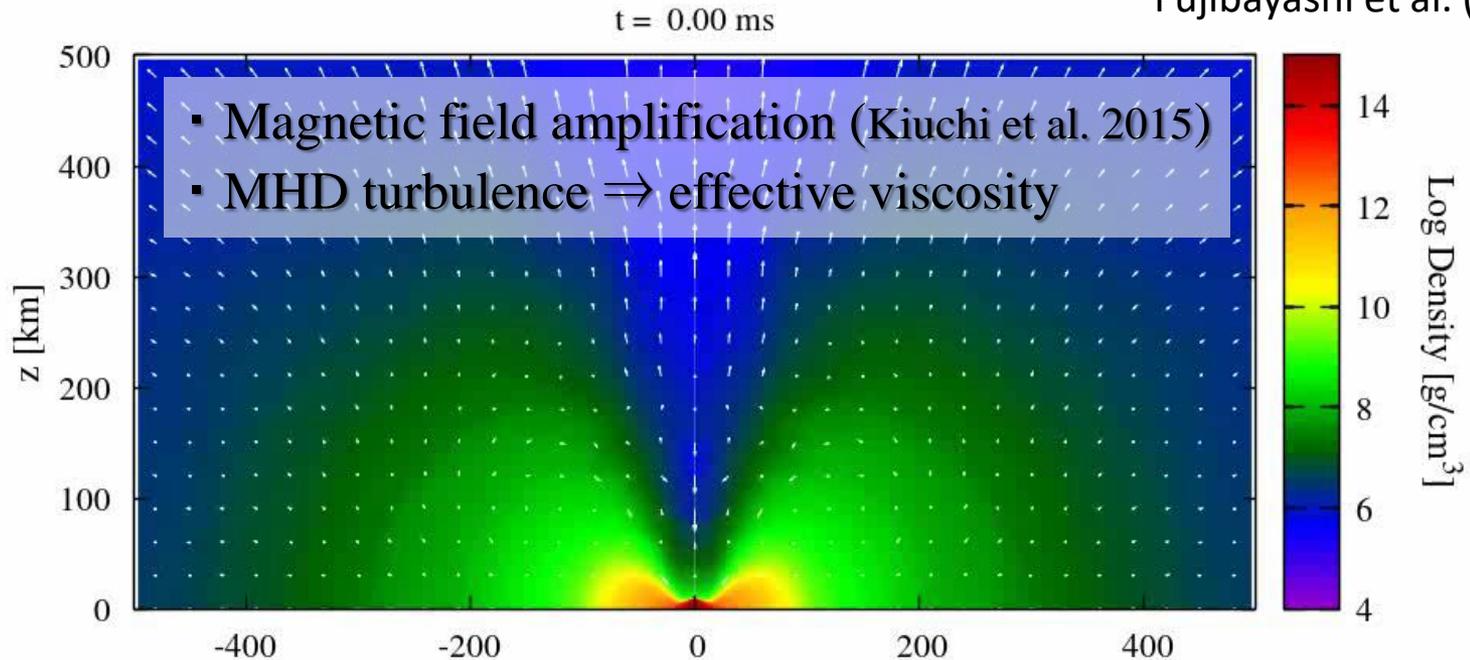
- ▶ rare earth 元素組成のばらつきはほとんどない
- ▶ 3rd peak の多少のばらつき
- ▶ $Z < 50$ の元素の比較的大きなばらつき

合体後の系からの質量放出における元素合成とあわせた解析へ



Mass ejection mechanisms : Viscous

Fujibayashi et al. (2018)



Merger



NS/BH + Torus

Dynamical ejection

Early & Long-term Viscous ejection

0

~ 1 ms

~ 10 ms

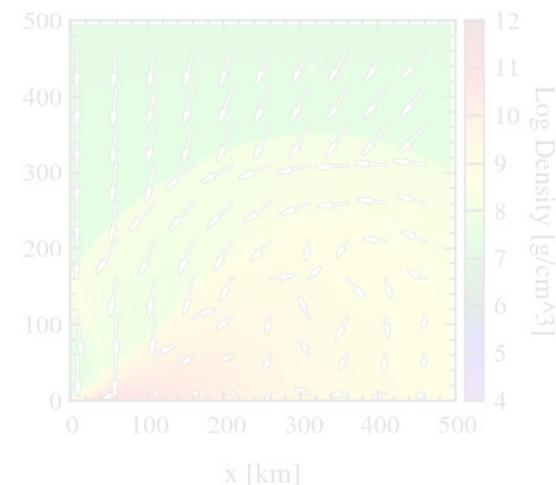
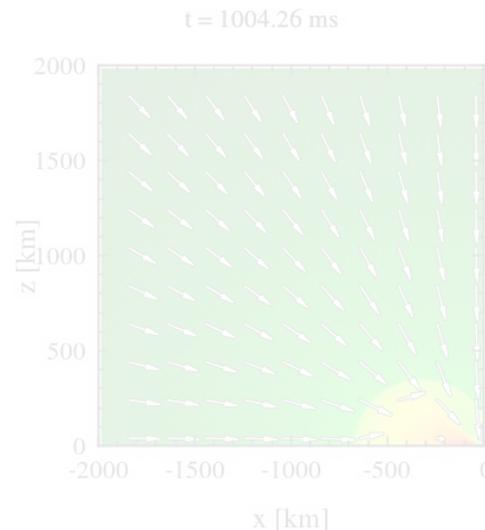
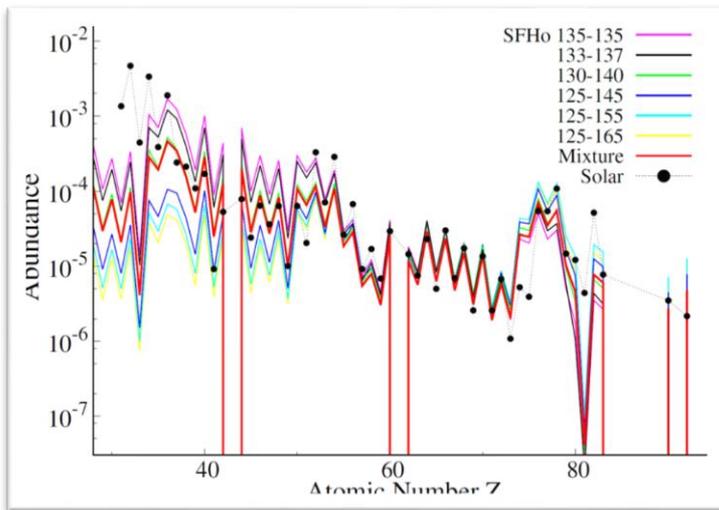
~ 100 ms

~ 1 s

~ 10 s

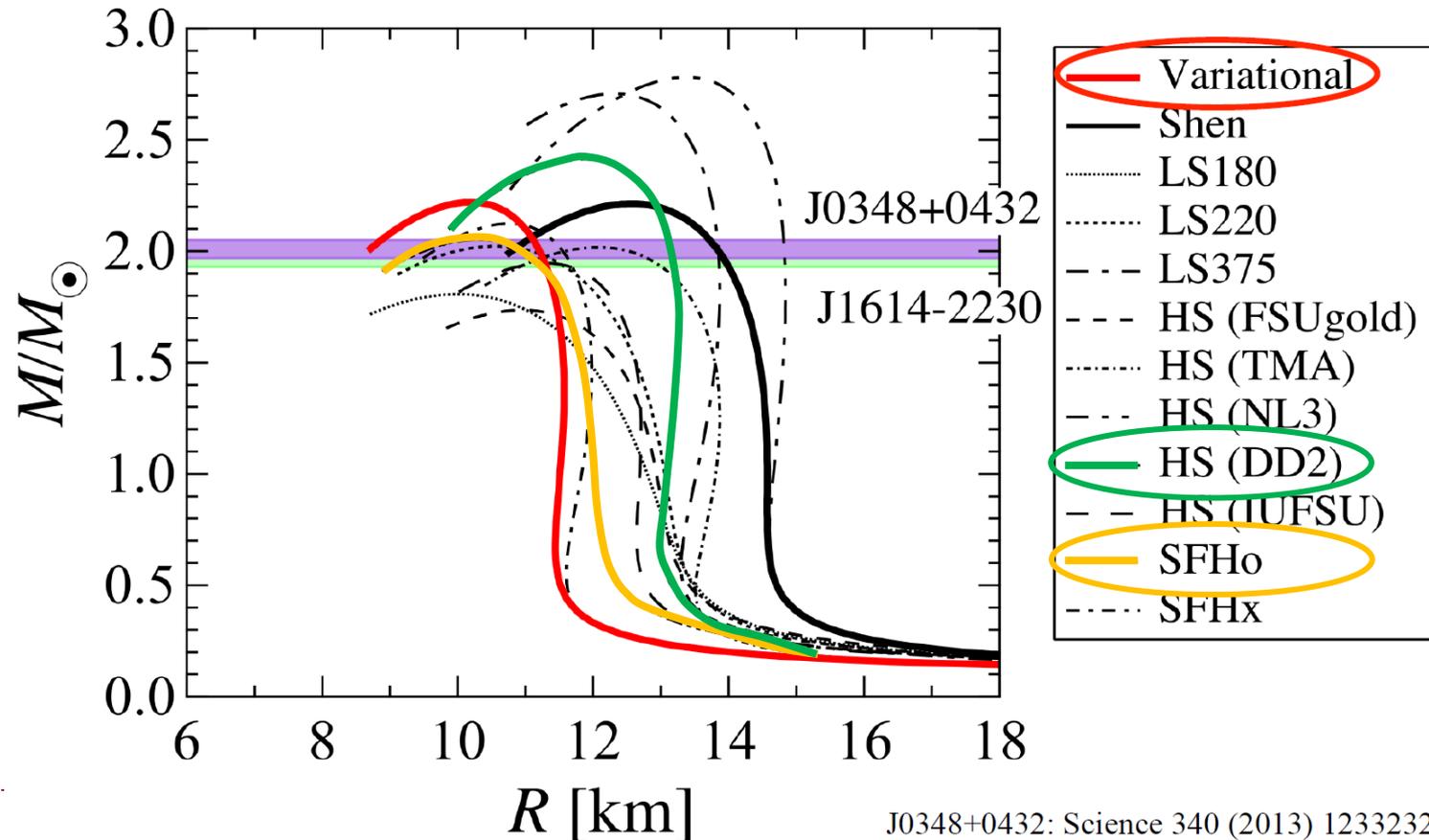
今年度の実施状況

- ▶ 連星中性子星合体時の動的質量放出における元素合成パターン
 - ▶ GW170817 に合致する状態方程式(SFH₀, DD2)を採用した前年度までの結果の利用
 - ▶ 元素合成パターンは金属欠乏星の観測結果と整合的
- ▶ 新しい状態方程式(Togashi et al. 2017)を用いた連星中性子星合体計算
 - ▶ 合体後~5ms でブラックホール形成。合体後~10ms まで計算終了。計算継続中。
 - ▶ 放出質量は現在 0.05 太陽質量程度。高分解能計算も開始。
- ▶ 大質量星(COコア)の重力崩壊の数値相対論的粘性流体シミュレーション
 - ▶ ブラックホール形成後 ~800 ms まで計算終了。計算継続中。
- ▶ Neutrino-radiation-hydrodynamics code の改良



Togashi EOS を用いた連星中性子星合体の数値相対論シミュレーション

- ▶ 現実的核力に基づく変分法による核物質状態方程式 (Togashi et al. 2017)
 - ▶ $M_{\max} \approx 2.2M_{\odot}$, $R_{1.4} \approx 11.5$ km
 - ▶ GW170817 の観測結果との整合性が高い (SFHo 最大質量: 小, DD2 半径大)



J0348+0432: Science 340 (2013) 1233232

J1614-2230: Nature 467 (2010) 1081

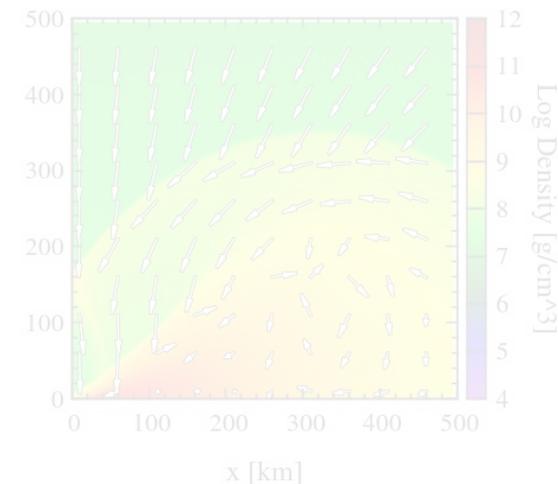
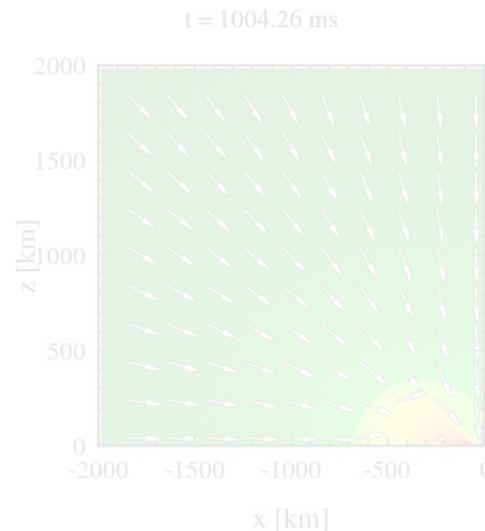
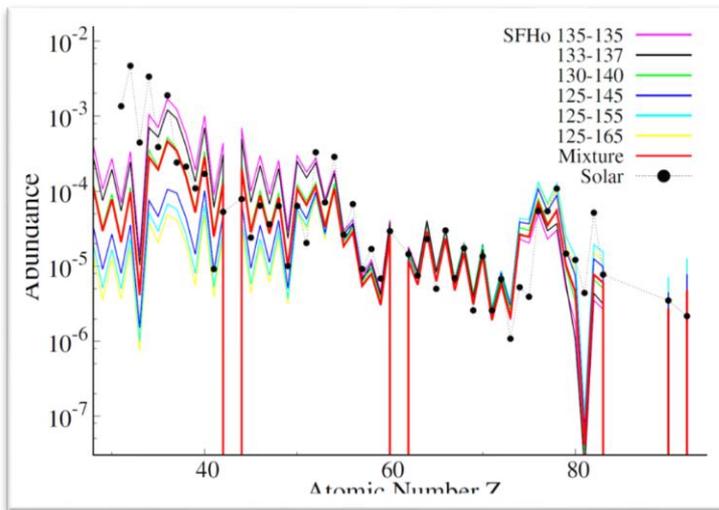
Togashi EOS を用いた連星中性子星合体の数値相対論シミュレーション

- ▶ 現実的核力に基づく変分法による核物質状態方程式 (Togashi et al. 2017)
 - ▶ $M_{\max} \approx 2.2M_{\odot}$, $R_{1.4} \approx 11.5$ km
 - ▶ GW170817 の観測結果との整合性が高い (SFHo 最大質量: 小, DD2 半径大)
 - ▶ $T \geq 0.1\text{MeV}$, $\rho \geq 10^{5.1}\text{g/cm}^3$ の領域に限られるので、低温・低密度領域を Timmes EOS (Timmes & Swesty 2000) に接続
- ▶ シミュレーションの進捗状況
 - ▶ (特に Togashi-Furusawa EOS) は状態方程式の連続性があまりよくないことに起因し、多くのトラブルが発生 \Rightarrow 何とか克服し計算可能に
 - ▶ $1.35M_{\odot} - 1.35M_{\odot}$ 分解能 250 m の場合、合体後 $\approx 5\text{ms}$ でブラックホール形成
 - ▶ 最大質量から考えるとやや早いか
 - ▶ \Rightarrow 高分解能計算を実行
 - ▶ 現在合体後 10 ms 程度まで計算終了。計算継続中。
 - ▶ 現状、放出質量は $\lesssim 0.005M_{\odot}$
 - ▶ 合体後 30 ms 程度まで計算を継続し、放出物質の性質を明らかにする



今年度の実施状況

- ▶ 連星中性子星合体時の動的質量放出における元素合成パターン
 - ▶ GW170817 に合致する状態方程式(SFH₀, DD2)を採用した前年度までの結果の利用
 - ▶ 元素合成パターンは金属欠乏星の観測結果と整合的
- ▶ 新しい状態方程式(Togashi et al. 2017)を用いた連星中性子星合体計算
 - ▶ 合体後~5ms でブラックホール形成。合体後~10ms まで計算終了。計算継続中。
 - ▶ 放出質量は現在 0.05 太陽質量程度。高分解能計算も開始。
- ▶ 大質量星(COコア)の重力崩壊の数値相対論的粘性流体シミュレーション
 - ▶ ブラックホール形成後 ~800 ms まで計算終了。計算継続中。
- ▶ Neutrino-radiation-hydrodynamics code の改良



大質量星(COコア)の重力崩壊の数値相対論的粘性流体シミュレーション

▶ [目的]

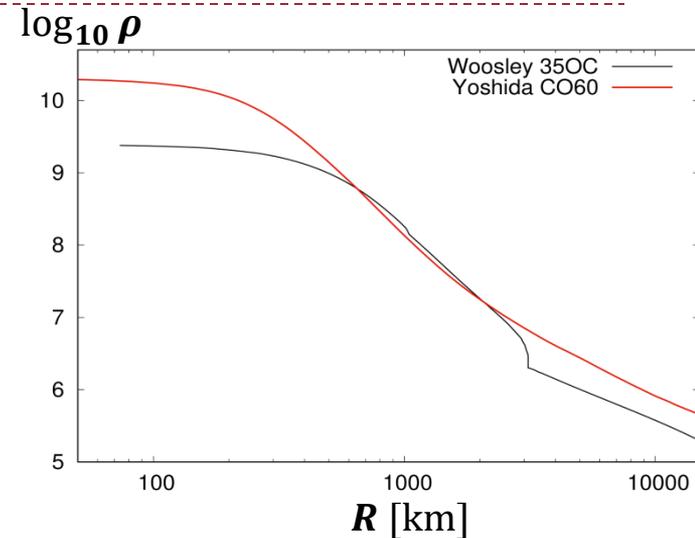
大質量星重力崩壊によるブラックホール形成における元素合成について明らかにしたい

▶ 初期条件: $60M_{\odot}$ COコアモデル (Yoshida et al.)

- ▶ 初期条件は球対称モデルなので回転を付与
- ▶ 密度分布はガンマ線バースト初期条件モデルと比較するとなめらか

▶ 一般相対論的粘性流体+ニュートリノ輻射輸送コードの利用

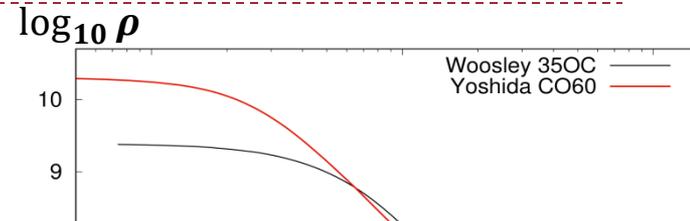
- ▶ Shibata et al. (2017); Fujibayashi et al. (2018)
- ▶ SFHo 状態方程式を採用



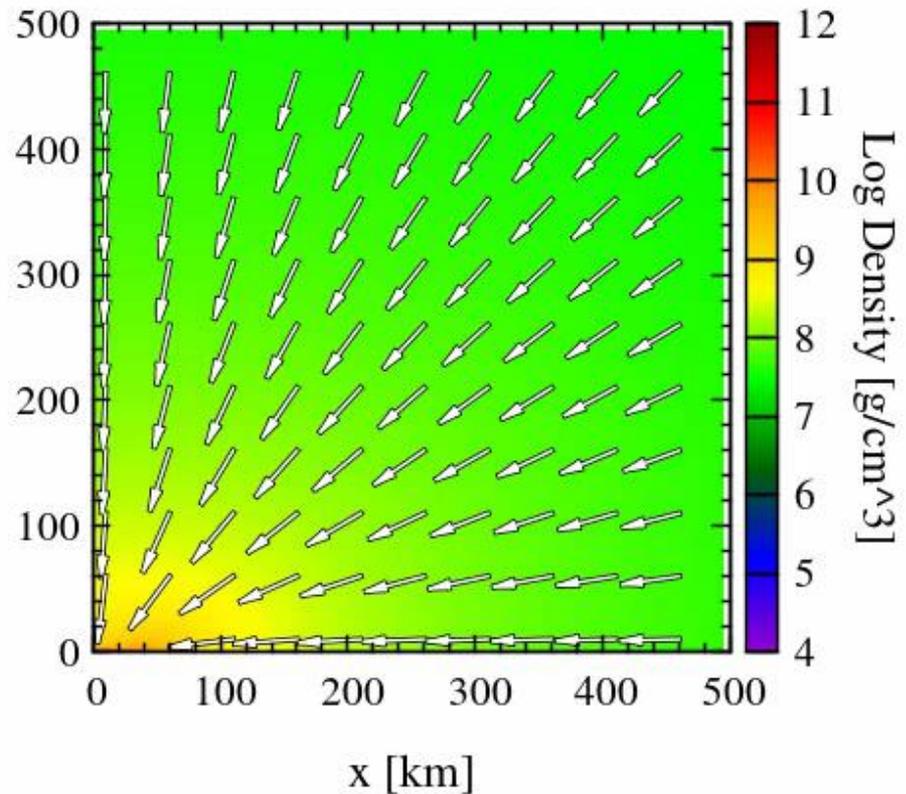
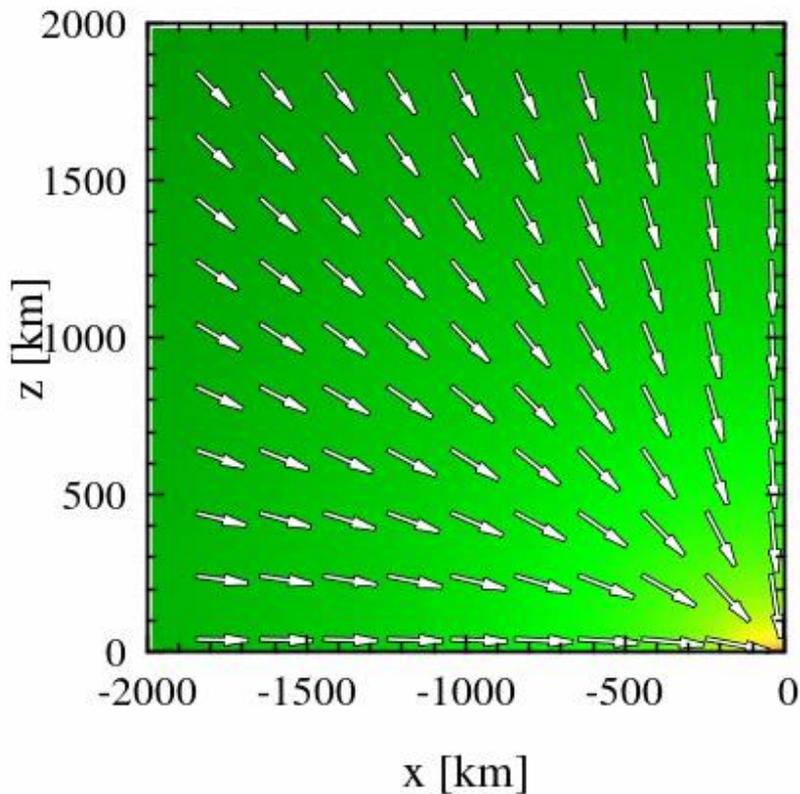
大質量星(COコア)の重力崩壊の数値相対論的粘性流体シミュレーション

▶ [目的]

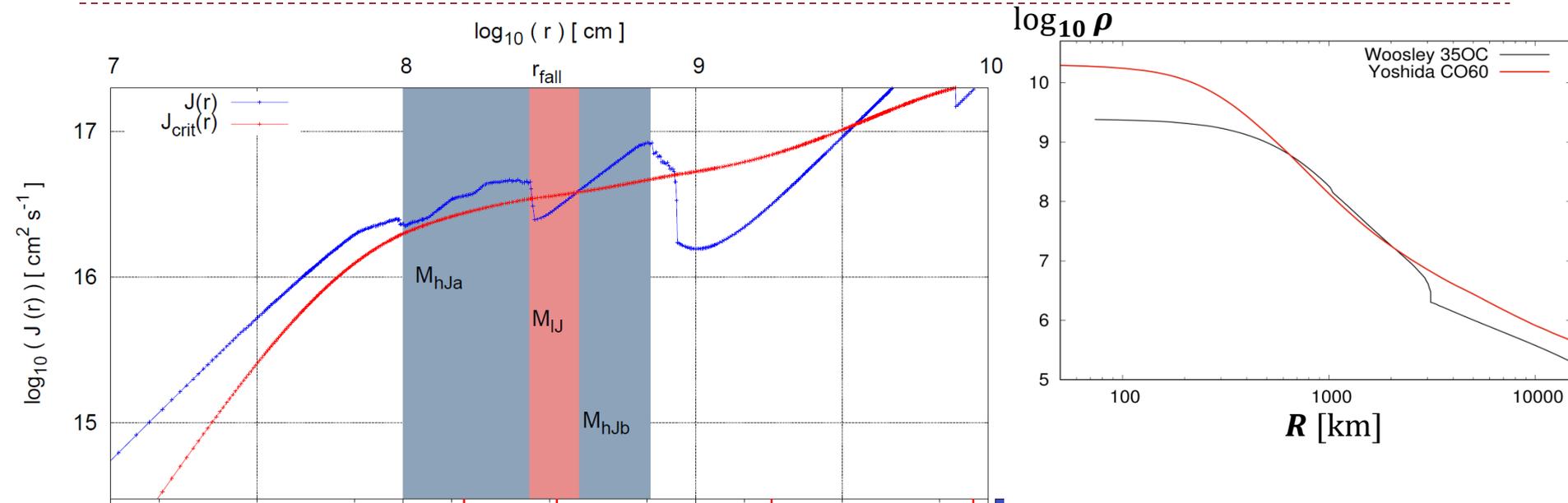
大質量星重力崩壊によるブラックホール形成における元素合成について明らかにしたい



t = 384.01 ms



大質量星(COコア)の重力崩壊の数値相対論的粘性流体シミュレーション



▶ ブラックホール形成後 800 ms を追跡

- ▶ 現状、衝撃波は広がっているが、アウトフローの発生はみられない
- ▶ 降着流体のラム圧に打ち勝つ必要があるが...
- ▶ 質量降着率の急激な変化がトリガーになる可能性
 - ▶ 燃焼殻付近での密度・角運動量分布の急激な変化が必要か
- ▶ 計算を継続中。初期条件依存性について調べていきたい。

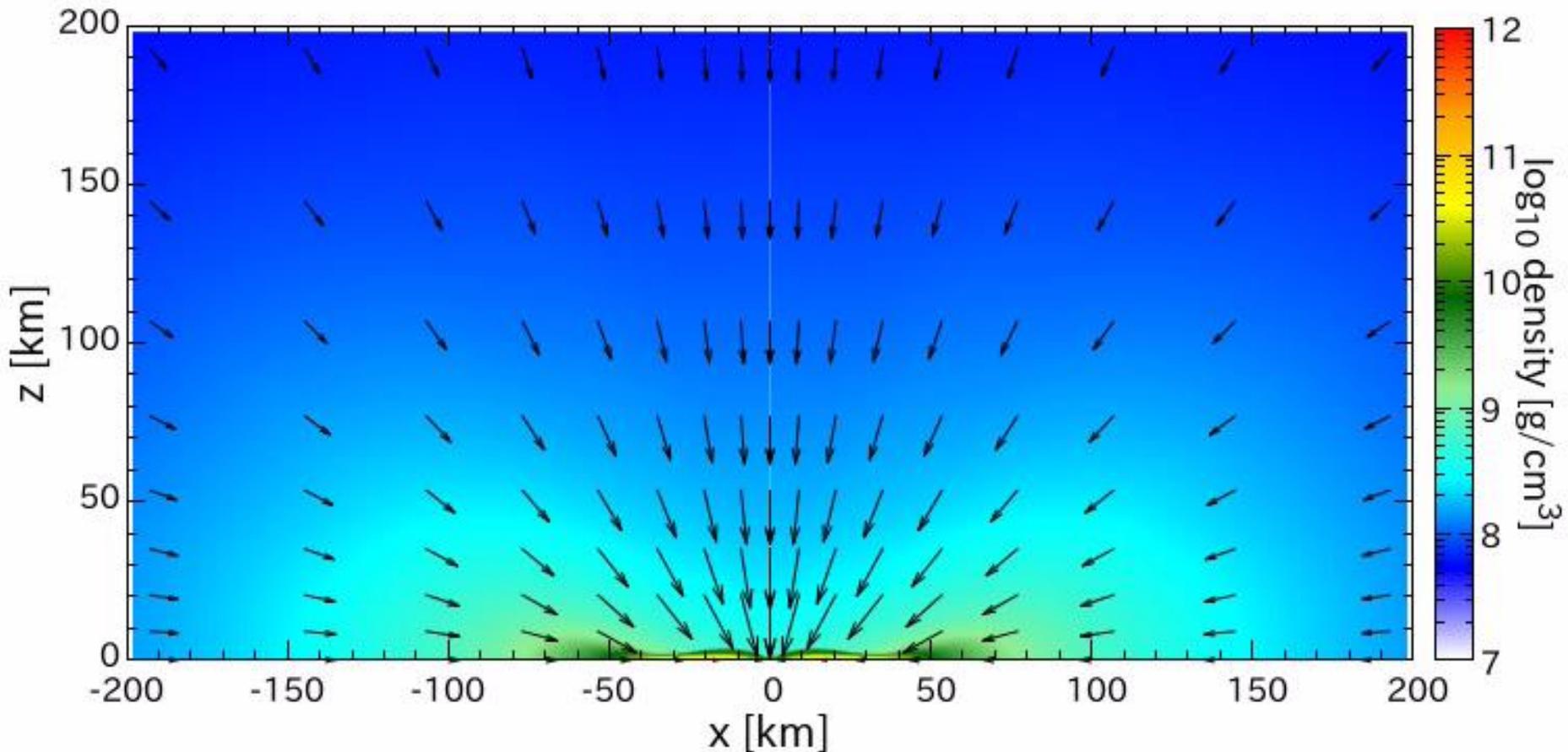
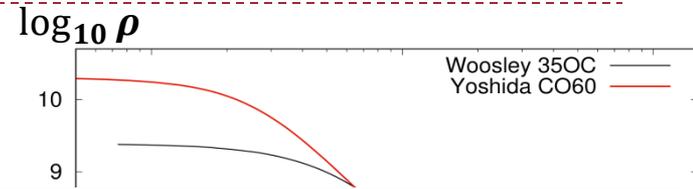


大質量星(COコア)の重力崩壊の数値相対論的粘性流体シミュレーション

▶ 初期条件: $60M_{\odot}$ COコアモデル (Yoshida et al.)

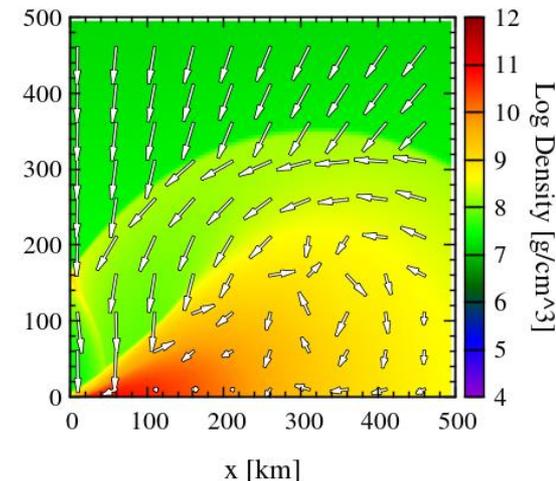
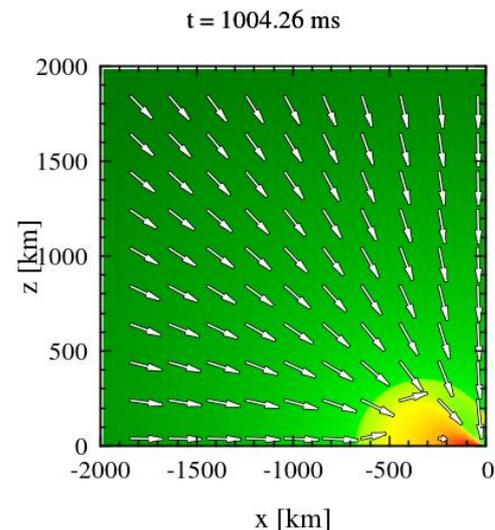
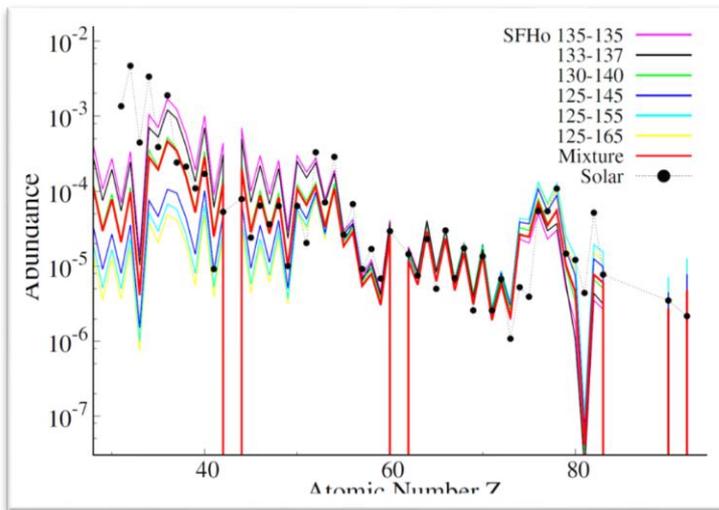
▶ 初期条件は球対称モデルなので回転を付与

$t = 1349.73394$ ms



今年度の実施状況

- ▶ 連星中性子星合体時の動的質量放出における元素合成パターン
 - ▶ GW170817 に合致する状態方程式(SFH₀, DD2)を採用した前年度までの結果の利用
 - ▶ 元素合成パターンは金属欠乏星の観測結果と整合的
- ▶ 新しい状態方程式(Togashi et al. 2017)を用いた連星中性子星合体計算
 - ▶ 合体後~5ms でブラックホール形成。合体後~10ms まで計算終了。計算継続中。
 - ▶ 放出質量は現在 0.05 太陽質量程度。高分解能計算も開始。
- ▶ 大質量星(COコア)の重力崩壊の数値相対論的粘性流体シミュレーション
 - ▶ ブラックホール形成後 ~800 ms まで計算終了。計算継続中。
- ▶ Neutrino-radiation-hydrodynamics code の改良



ポスト京を見据えた ニュートリノ輻射輸送コードの改良

▶ スペクトル平均した opacity の改良

- ▶ 分母・分子ともに評価可能だがベータ平衡で不定形になる
 - ▶ これまでは opacity は右式では評価していなかった
- ▶ ロピタルの定理と Fermi-Dirac 積分の性質を用いた評価
- ▶ ベータ平衡近傍において Gray 極限で厳密なソース項を回復

$$\kappa_{av} = \frac{\dot{Q}_+ - \dot{Q}_-}{J_{eq} - J}$$

▶ 近似リーマン解法の問題点の改善

- ▶ diffusion 極限で数値流速(各種フラックス)が正しく評価されない
- ▶ Audit et al. (2002); Jin & Levermore (1996); Foucart et al. (2016) によるスキームの実装
 - ▶ 従来は Audit et al. (2002) の処方のみ

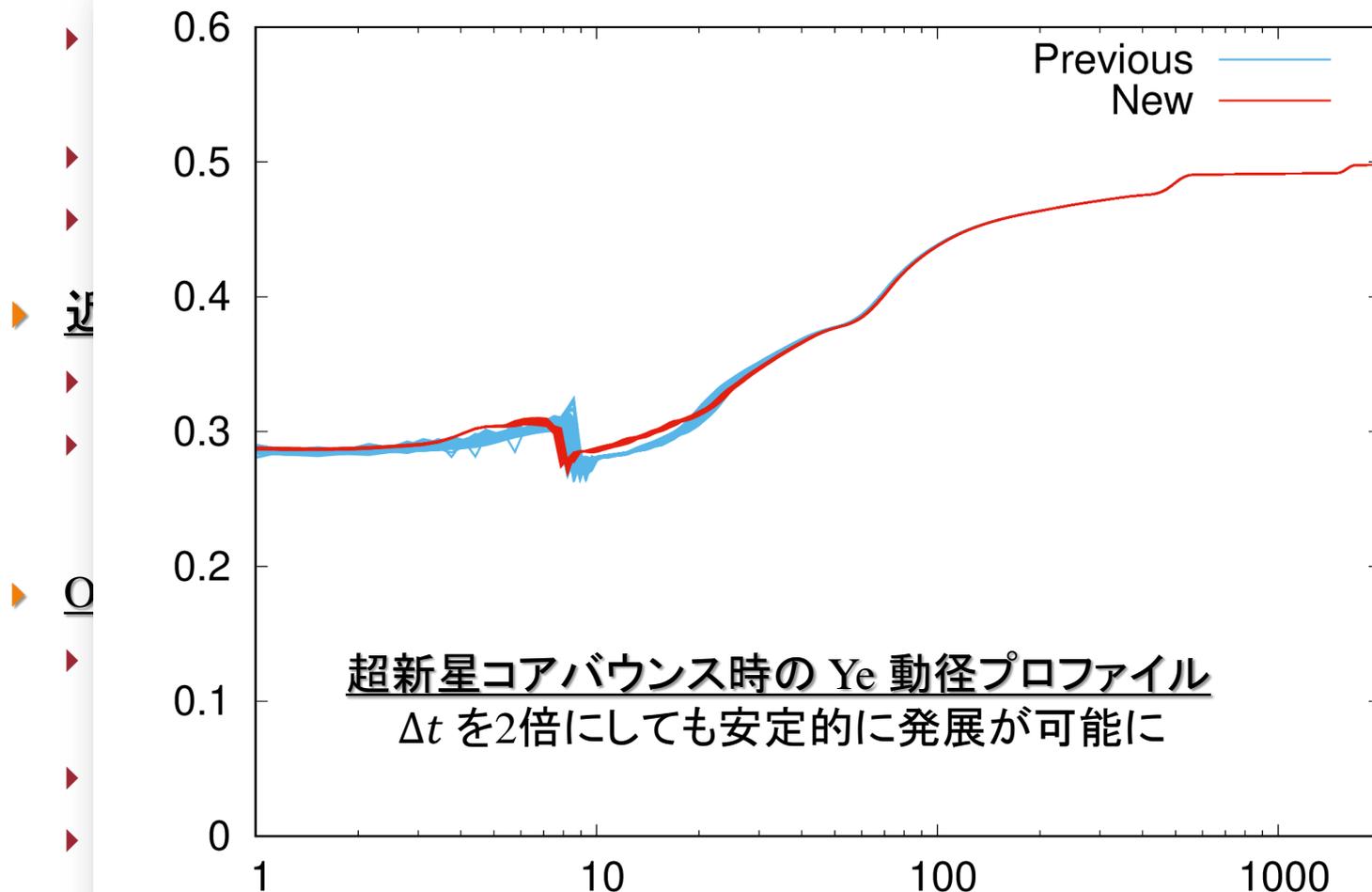
▶ Operator splitting + Implicit-Explicit(IMEX)-Runge-Kutta による発展スキーム

- ▶ 流体場の移流項と重力ソース項は IMEX から分離
 - ▶ 従来はすべて IMEX スキームの枠組みに入れていた
- ▶ opacity は各 operator splitting の時間発展毎にアップデート
- ▶ その他、テスト計算結果に基づく調整



ポスト京を見据えた ニュートリノ輻射輸送コードの改良

▶ スペクトル平均した opacity の改良



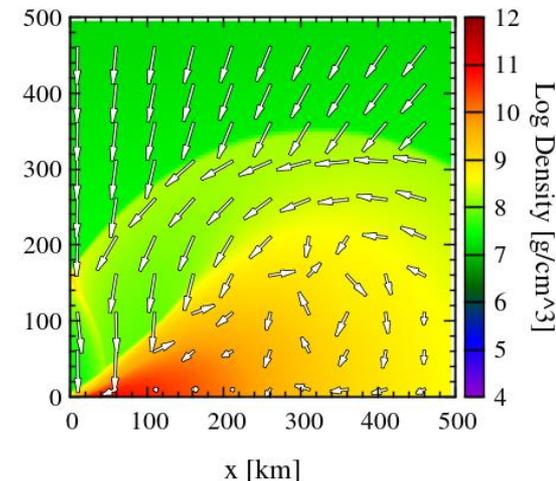
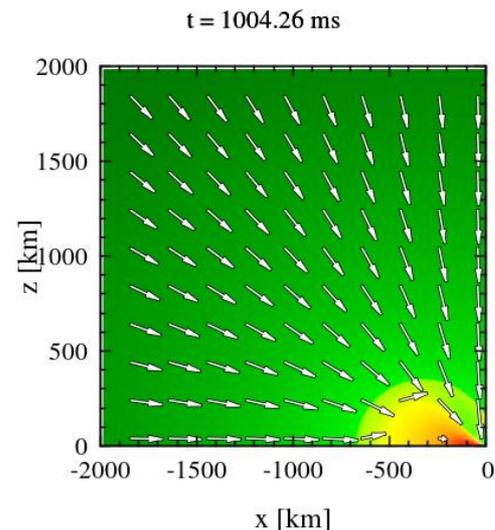
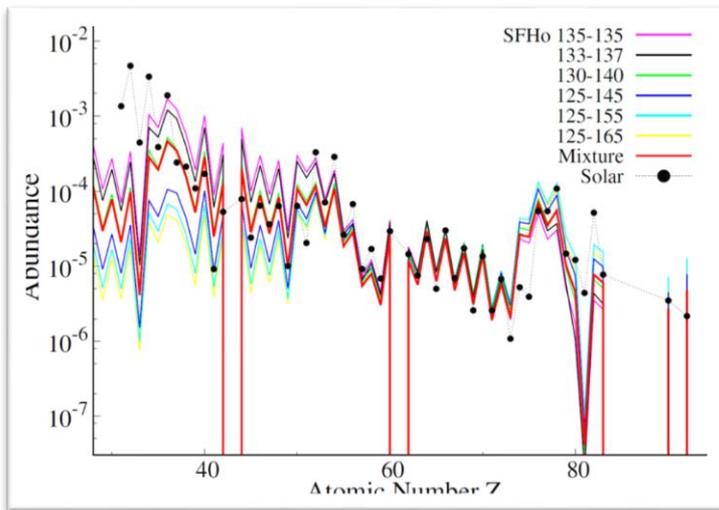
$$\frac{-\dot{Q}_-}{\epsilon_{\text{eq}} - J}$$

の実装

ーム

今年度の実施状況

- ▶ 連星中性子星合体時の動的質量放出における元素合成パターン
 - ▶ GW170817 に合致する状態方程式(SFH₀, DD2)を採用した前年度までの結果の利用
 - ▶ 元素合成パターンは金属欠乏星の観測結果と整合的
- ▶ 新しい状態方程式(Togashi et al. 2017)を用いた連星中性子星合体計算
 - ▶ 合体後~5ms でブラックホール形成。合体後~10ms まで計算終了。計算継続中。
 - ▶ 放出質量は現在 0.05 太陽質量程度。高分解能計算も開始。
- ▶ 大質量星(COコア)の重力崩壊の数値相対論的粘性流体シミュレーション
 - ▶ ブラックホール形成後 ~800 ms まで計算終了。計算継続中。
- ▶ Neutrino-radiation-hydrodynamics code の改良



来年度以降の実施計画

- ▶ 新しい状態方程式(Togashi et al. 2017)を用いた連星中性子星合体計算
 - ▶ 連星質量や質量比を変えた場合を含め、合体後~50ms 程度まで計算を継続。
 - ▶ 放出物質の総量や熱力学的・化学的特性を明らかにする。
 - ▶ ブラックホール形成が予想より早いので、高分解能計算を行いチェックする。
- ▶ 大質量星(COコア)の重力崩壊の数値相対論的粘性流体シミュレーション
 - ▶ 降着外層物質のラム圧に打ち勝って質量放出が起こる段階まで計算を継続。
 - ▶ 放出物質の総量や熱力学的・化学的特性を明らかにする。
 - ▶ 質量放出メカニズムに外層の密度不連続が重要になる可能性
 - ▶ 粘性係数、さらに可能であれば初期条件モデルを変えた計算を実行予定。
- ▶ Neutrino-radiation-hydrodynamics code の改良
 - ▶ 今年度の改良により、ベータ平衡において正しい gray 近似解法、operator splitting と Implicit-Explicit 法を組み合わせたより安定なスキーム、diffusion limit における流体ソルバの弱点を解消する手法 (Foucart et al. 2016)、などを組み入れた非並列コードを開発。
 - ▶ 逐次これらのアップデートを並列コードに実装していく。

