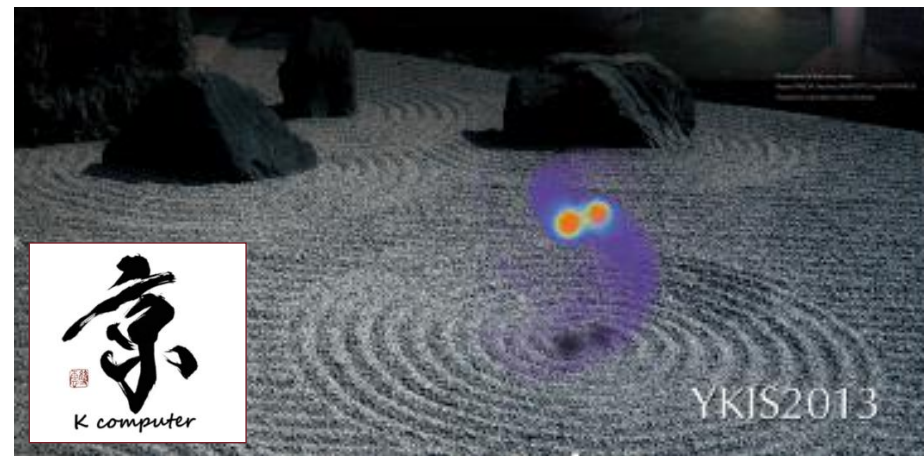




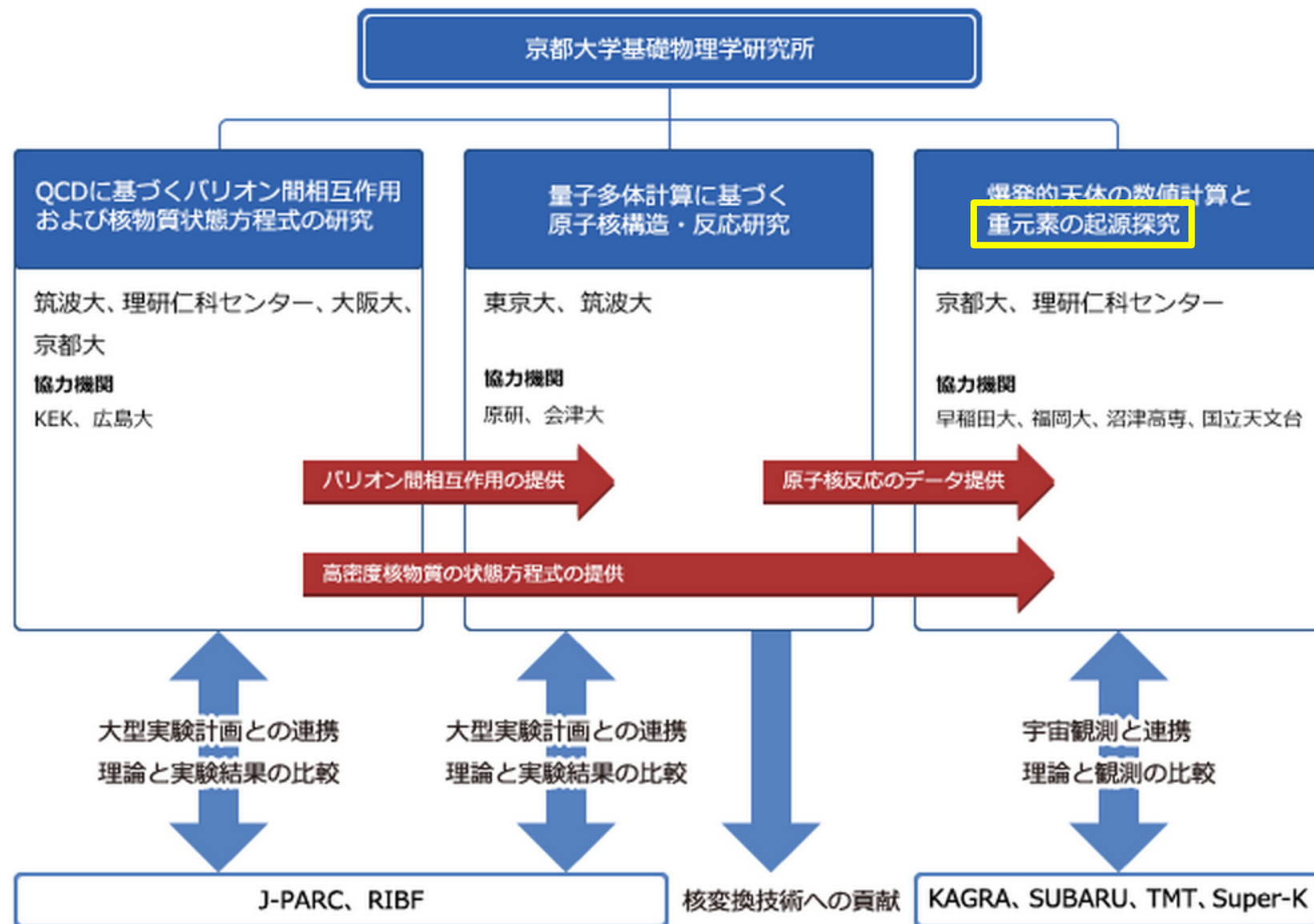
コンパクト天体連星の合体と元素の起源

- ポスト京における連星合体シミュレーション -

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)
田中雅臣 (NAOJ), 木内建太 (YITP), 柴田大 (YITP)

サブ課題B：物質創成史の解明と物質変換



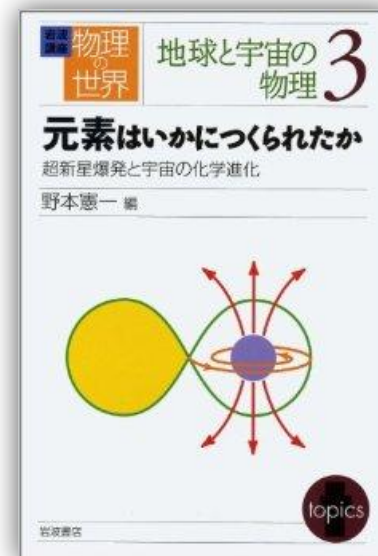
r-process 元素合成(金の起源)はどこで起こっているか?

▶ 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、その場合には中性子過剰環境を保てない
- ▶ 観測的制約 (Universality : r-process 元素の合成パターンは太陽組成とよく似ている) を満たすことは困難

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

- ▶ 京コンピュータを用いた系統的計算
 - ▶ 観測とコンシステントな結果
 - ▶ ⇒ 連星中性子星合体が金やウランなどの重元素の起源の可能性
 - ▶ Sekiguchi et al. (2015); Wanajo, YS et al. (2014)



連星合体シミュレーション：京における結果等

▶ 一般相対論効果の重要性

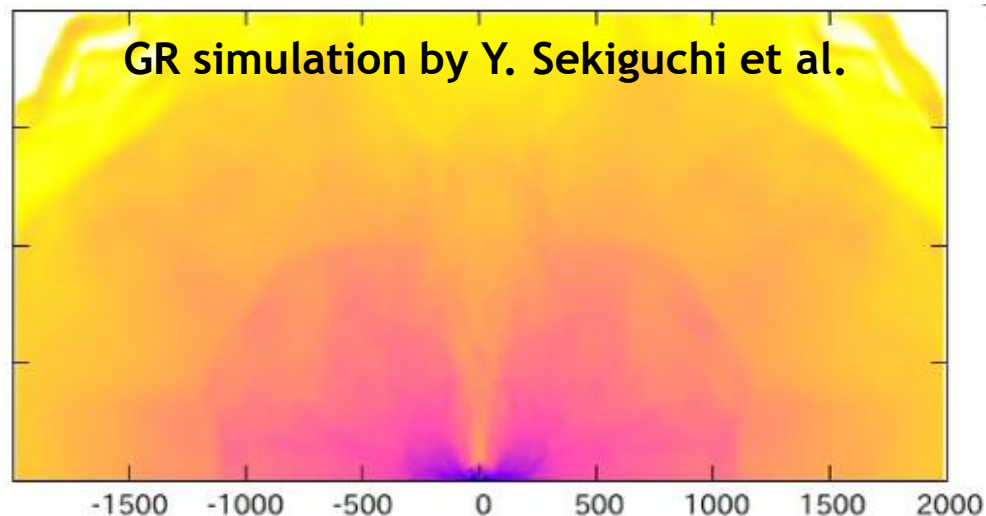
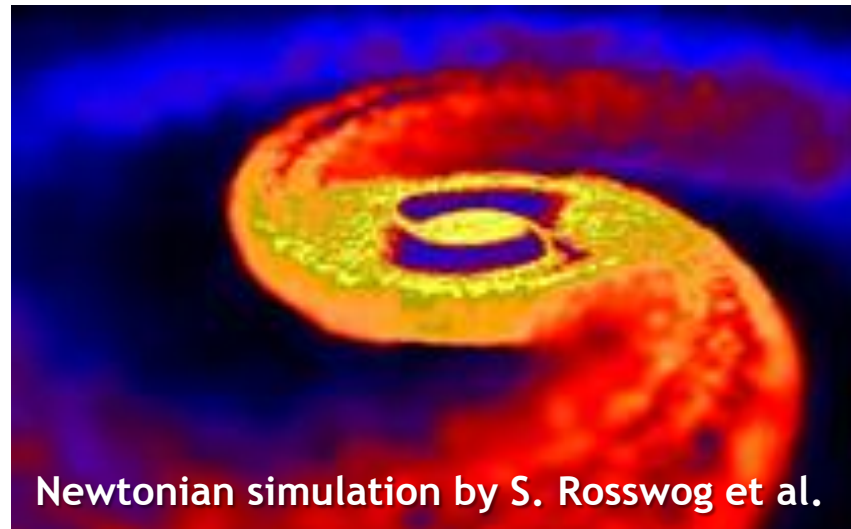
- ▶ 衝撃波加熱に大きな違い
(vs. ニュートン重力)
- ▶ 温度(弱い相互作用)に影響

▶ ニュートリノ反応の重要性

- ▶ 一般相対論的輻射流体計算
 - ▶ 連星合体計算特有の困難
 - ▶ 京で開発したコードの適用

▶ 磁場の影響は無視できない

- ▶ c.f. BH-NS 合体計算
(木内さんの講演)
- ▶ 一般相対論的輻射磁気流体計算
 - ▶ 高分解能の必要性



連星合体シミュレーション：京における結果等

▶ 一般相対論効果の重要性

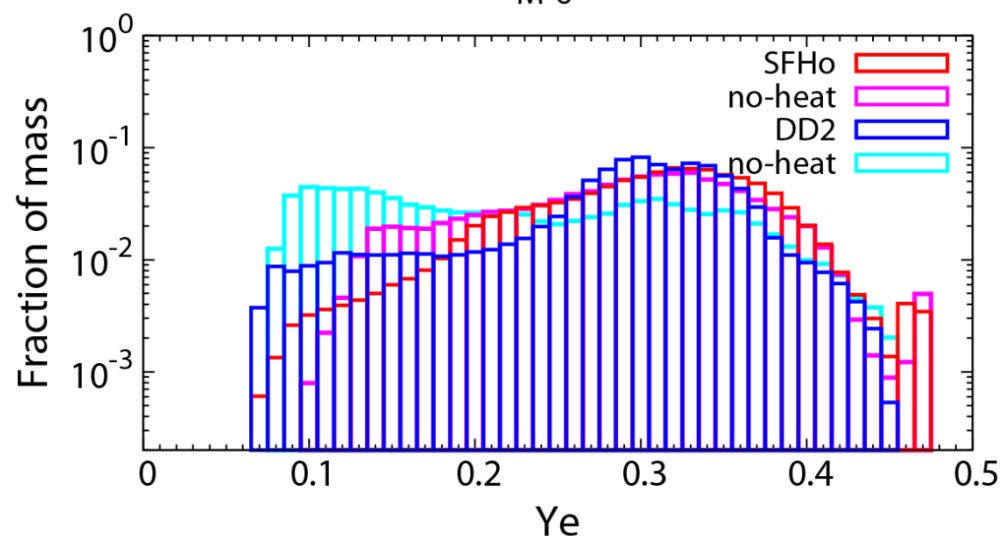
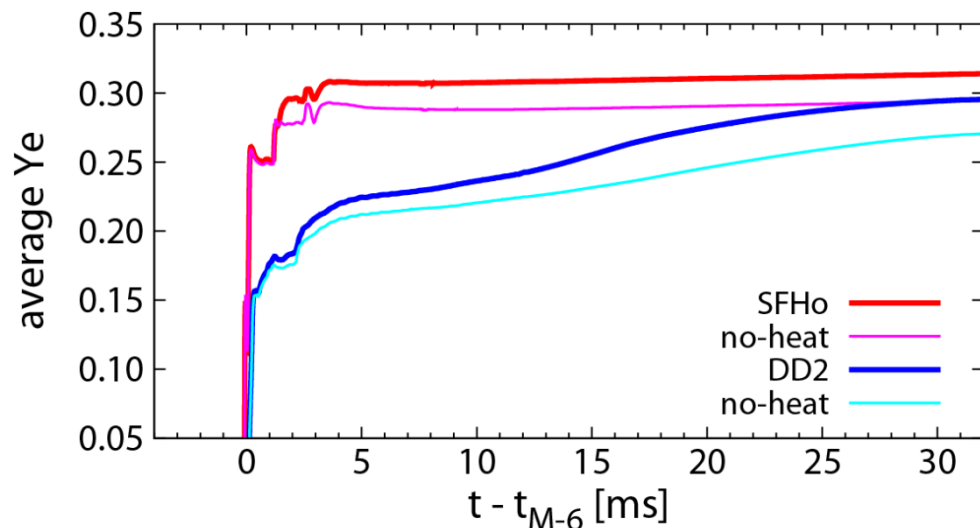
- ▶ 衝撃波加熱に大きな違い (vs. ニュートン重力)
- ▶ 温度(弱い相互作用)に影響

▶ ニュートリノ反応の重要性

- ▶ 一般相対論的輻射流体計算
 - ▶ 連星合体計算特有の困難
 - ▶ 京で開発したコードの適用

▶ 磁場の影響は無視できない

- ▶ c.f. BH-NS 合体計算 (木内さんの講演)
- ▶ 一般相対論的輻射磁気流体計算
 - ▶ 高分解能の必要性



連星合体シミュレーション

▶ 一般相対論効果の重要性

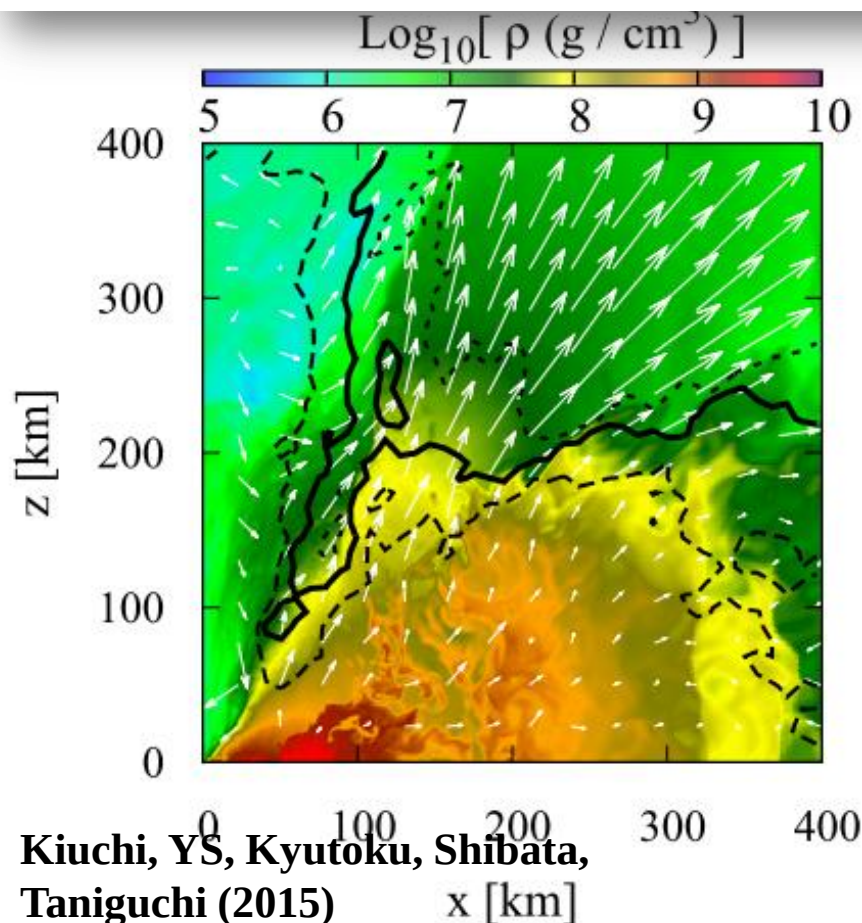
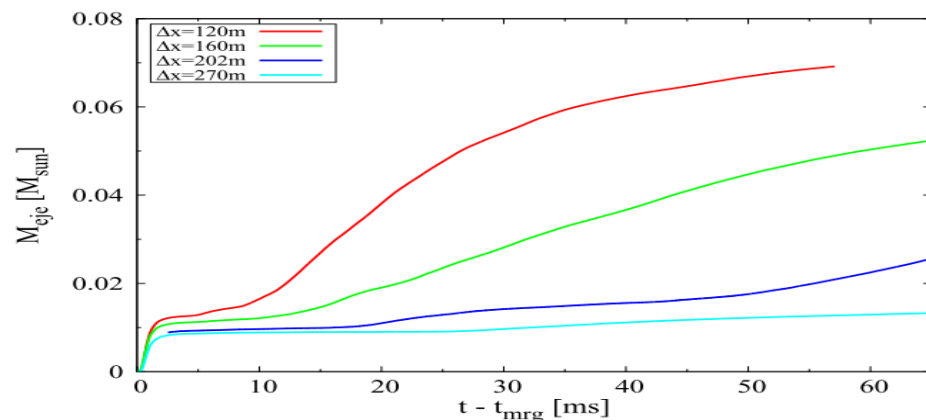
- ▶ 衝撃波加熱に大きな違い
(vs. ニュートン重力)
- ▶ 温度(弱い相互作用)に影響

▶ ニュートリノ反応の重要性

- ▶ 一般相対論的輻射流体計算
 - ▶ 連星合体計算特有の困難
 - ▶ 京で開発したコードの適用

▶ 磁場の影響は無視できない

- ▶ c.f. BH-NS 合体計算
(MHD winds: 木内さんの講演)
- ▶ 一般相対論的輻射磁気流体計算
 - ▶ 高分解能の必要性

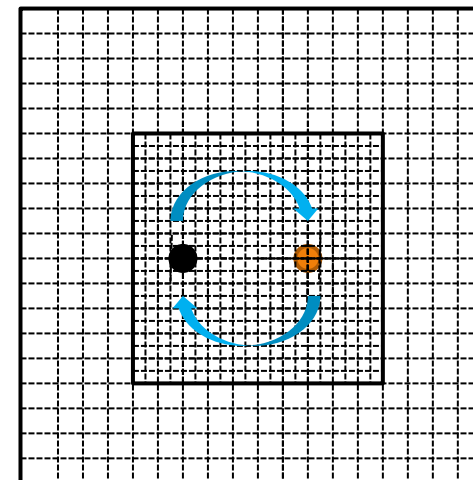


Kiuchi, YS, Kyutoku, Shibata,
Taniguchi (2015)

想定されるシミュレーションの概要(NS-NS)

▶ 数値相対論的輻射磁気流体シミュレーション

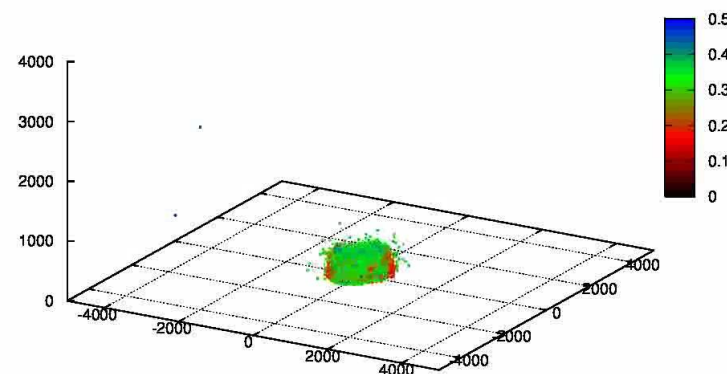
- ▶ 分解能: $dx \sim 70m$
- ▶ グリッド数: $\sim 1000^3$
- ▶ 想定計算時間: 100ms 追って ~ 800 万ノード時間
(京からの外挿)
 - ▶ The EOS を採用したいが、モデル計算も必要
 - ▶ 連星パラメータを探索
- ▶ Fixed mesh refinement
- ▶ 輻射輸送の改良



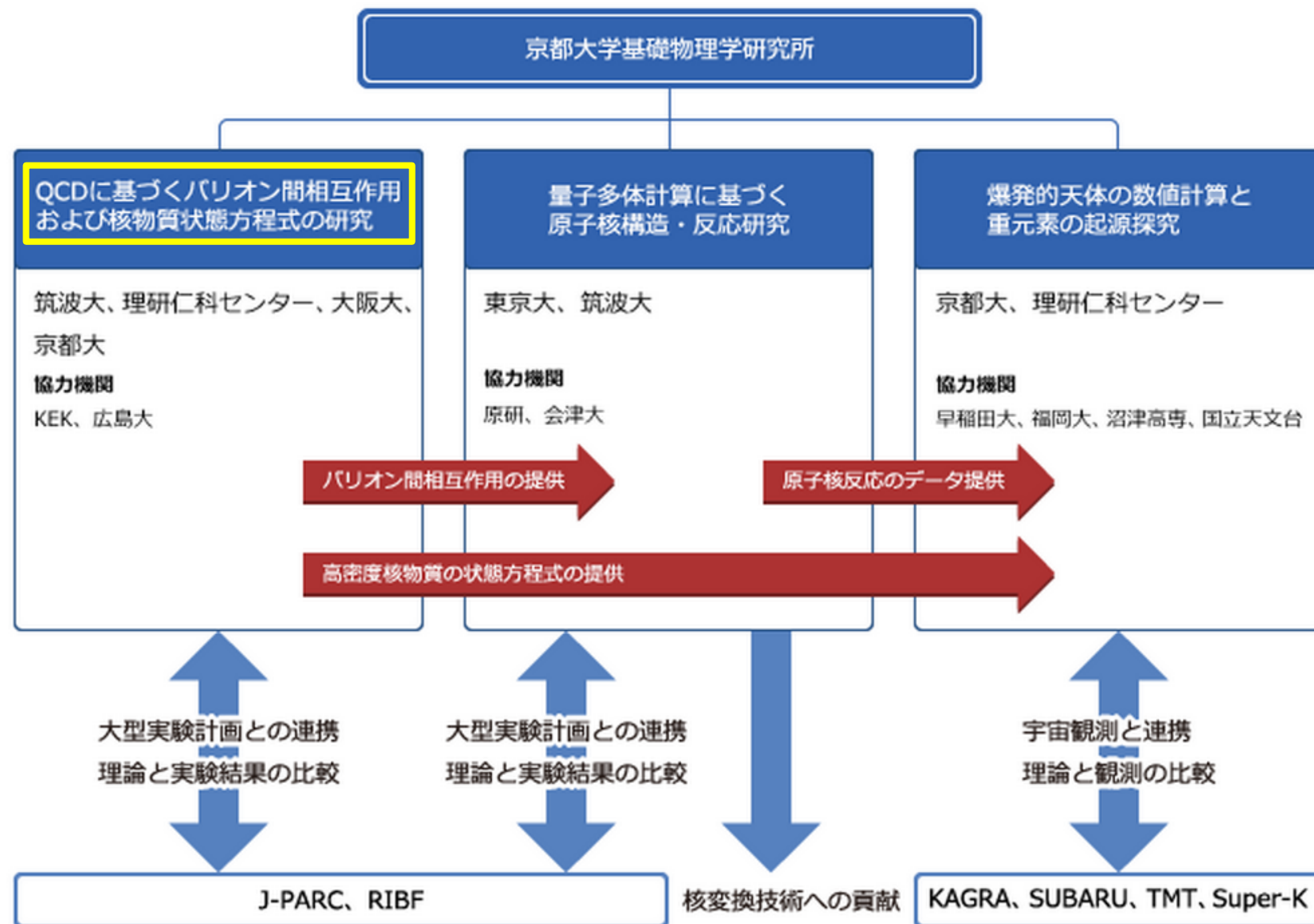
Y_0 of NSNS: -33.96411 ms

▶ ポストプロセスによる元素合成計算

- ▶ データ量大
- ▶ 1モデル $\sim 100TB$

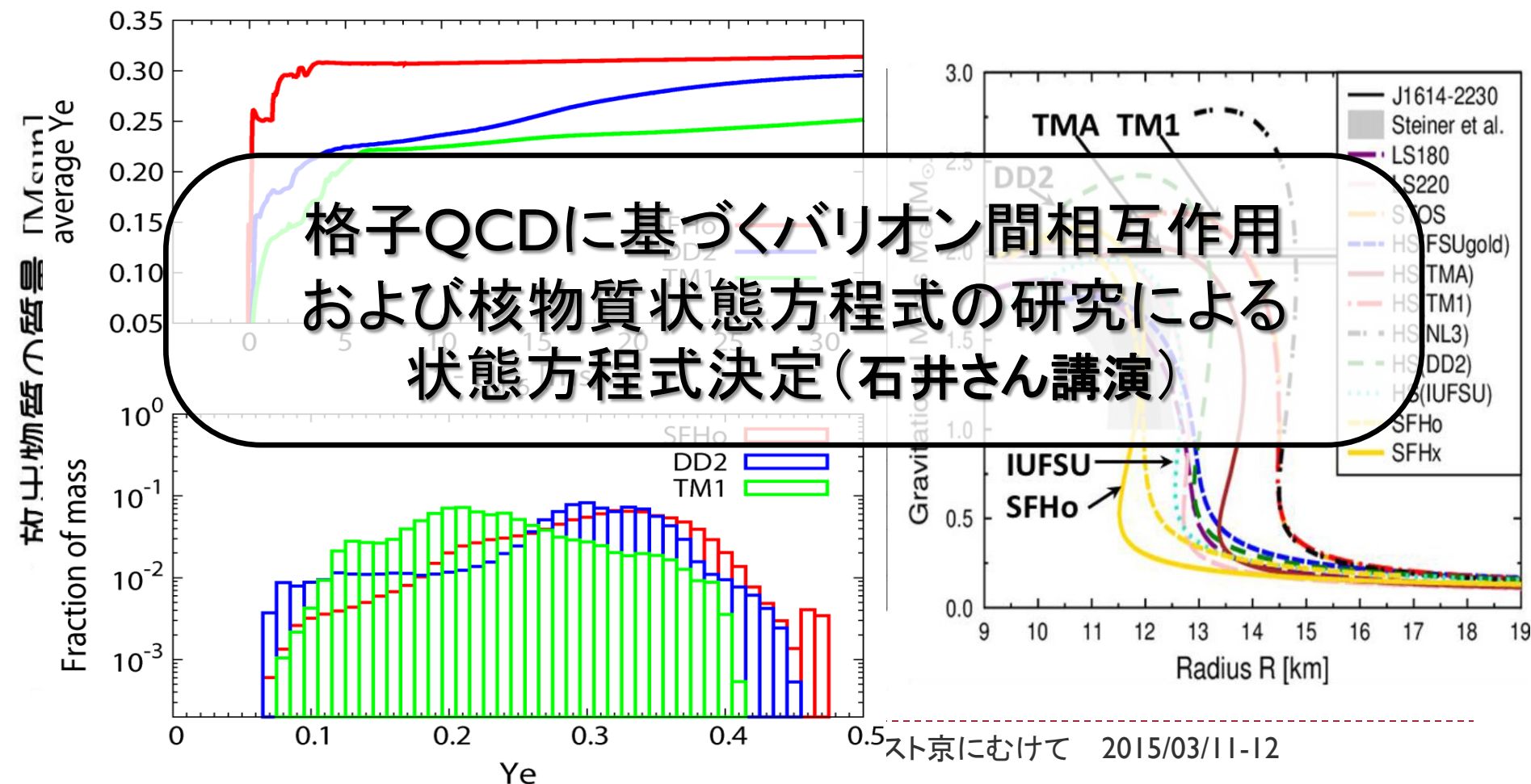


Input Microphysics (1)



状態方程式依存性

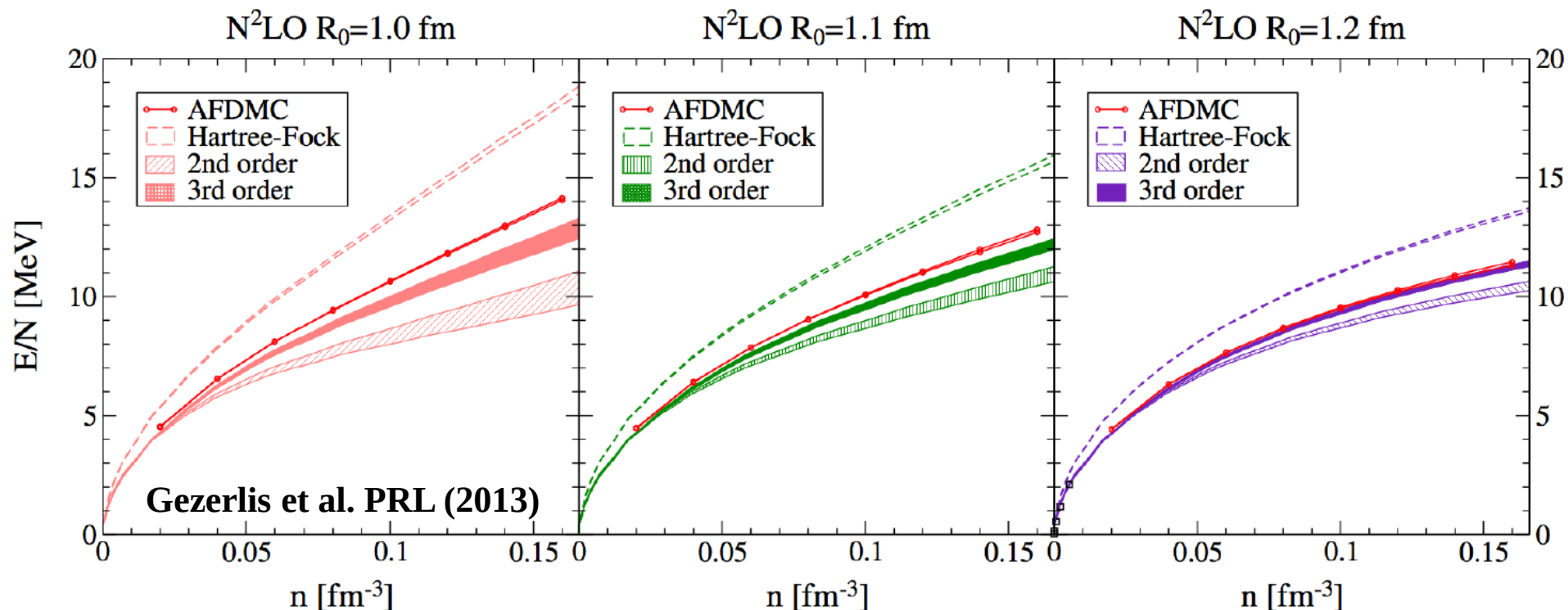
- ▶ 合体時に動的に放出される物質の質量は状態方程式に強く依存
- ▶ Y_e も状態方程式によって異なる



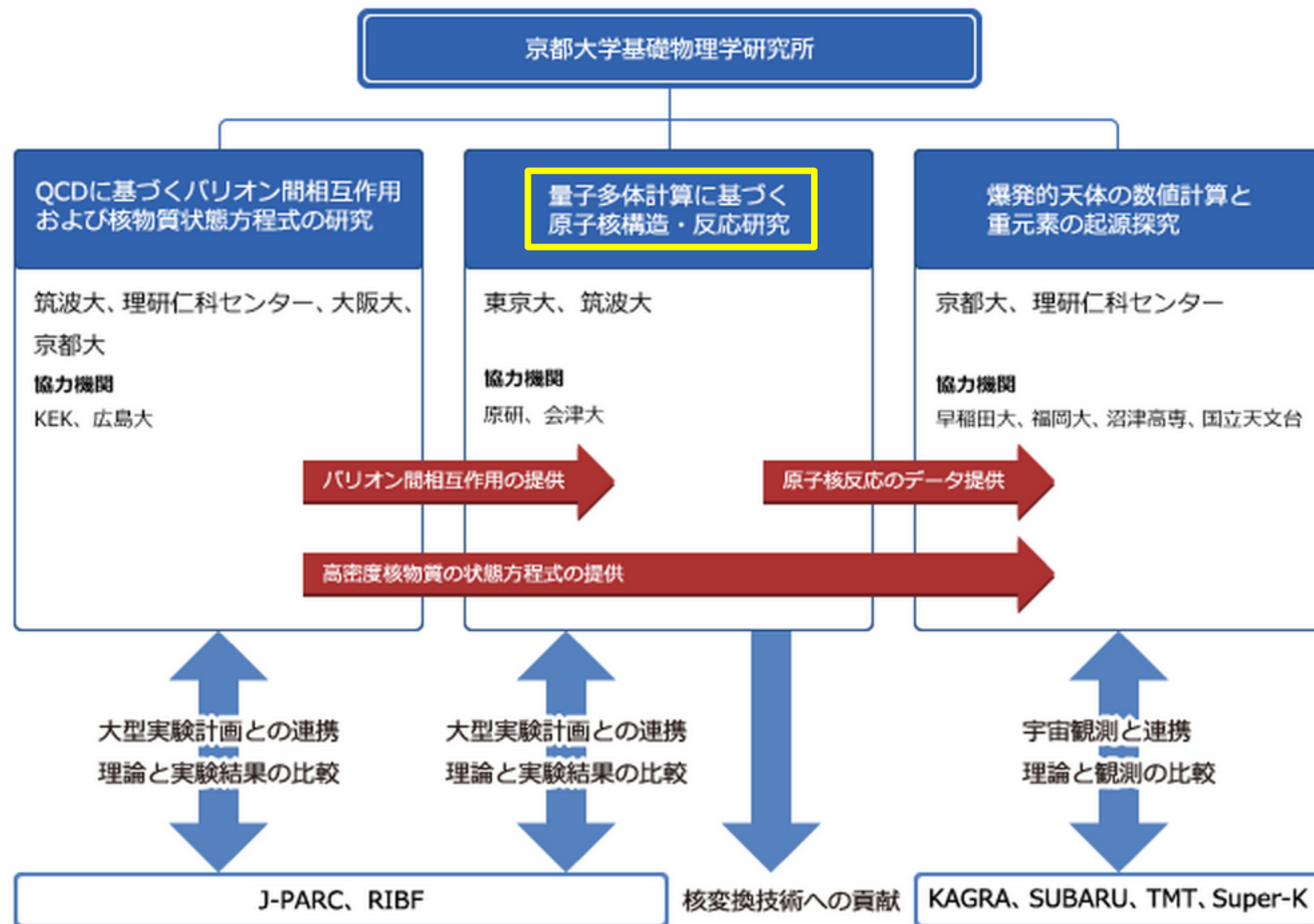
多体量子系計算の違いは重要になるか？

▶ Quantum Monte Carlo 計算と Hartree-Fock 計算の比較

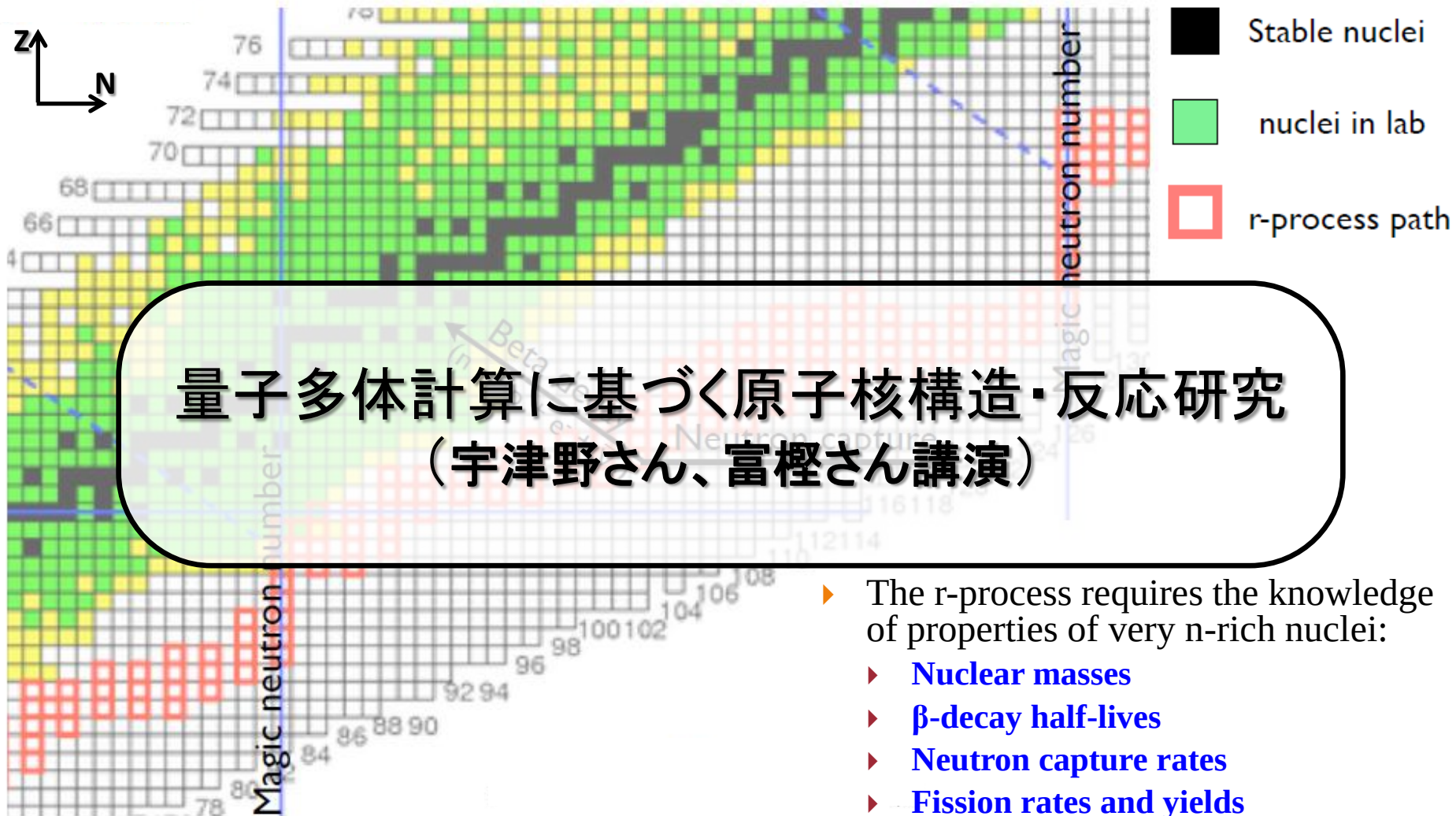
- ▶ Local chiral EFT potential
- ▶ Low cutoff ($\sim 400\text{MeV}$) では両者はよく一致するが、



Input Microphysics (2)

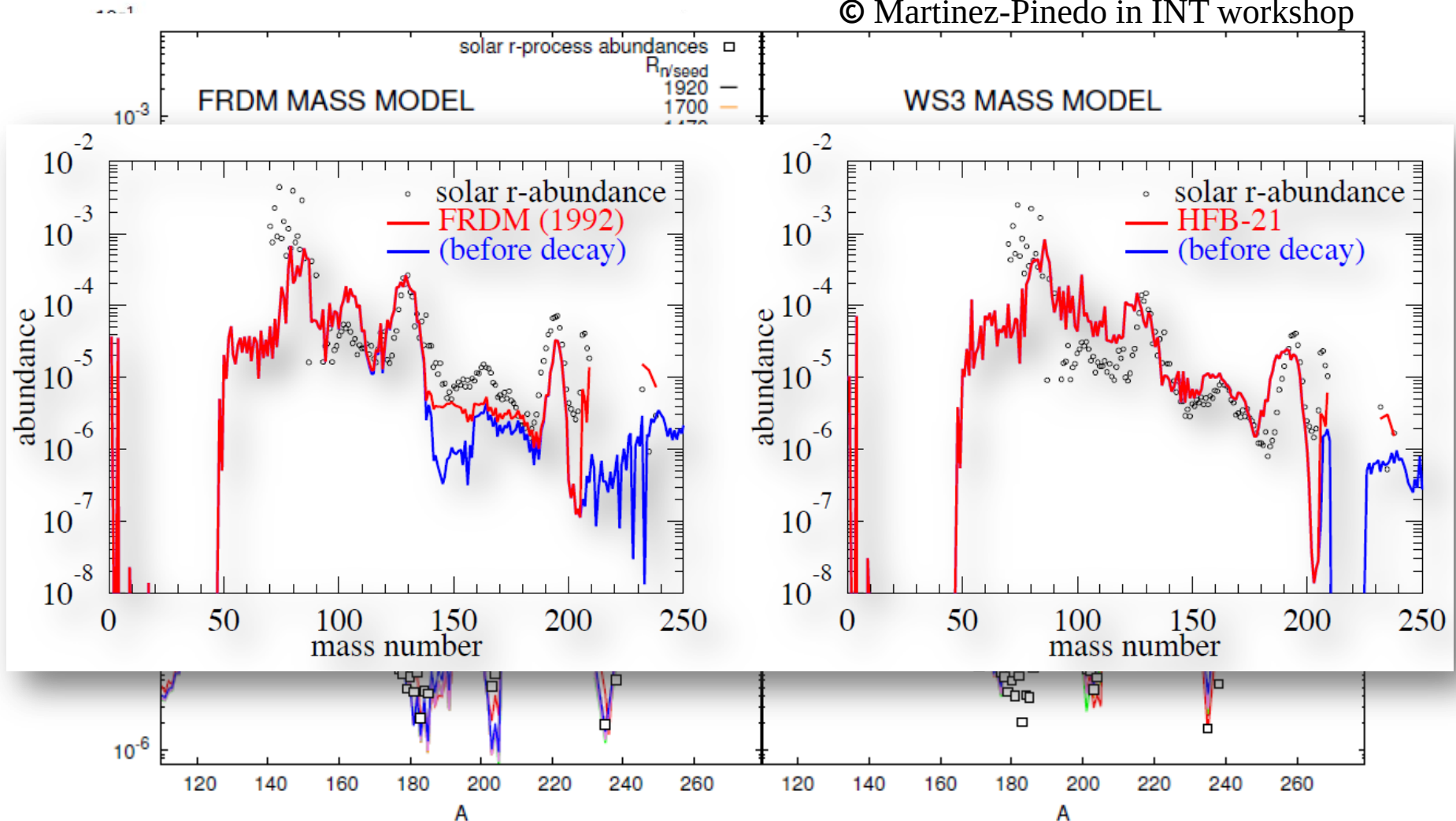


r-process 元素合成: nuclear physics inputs



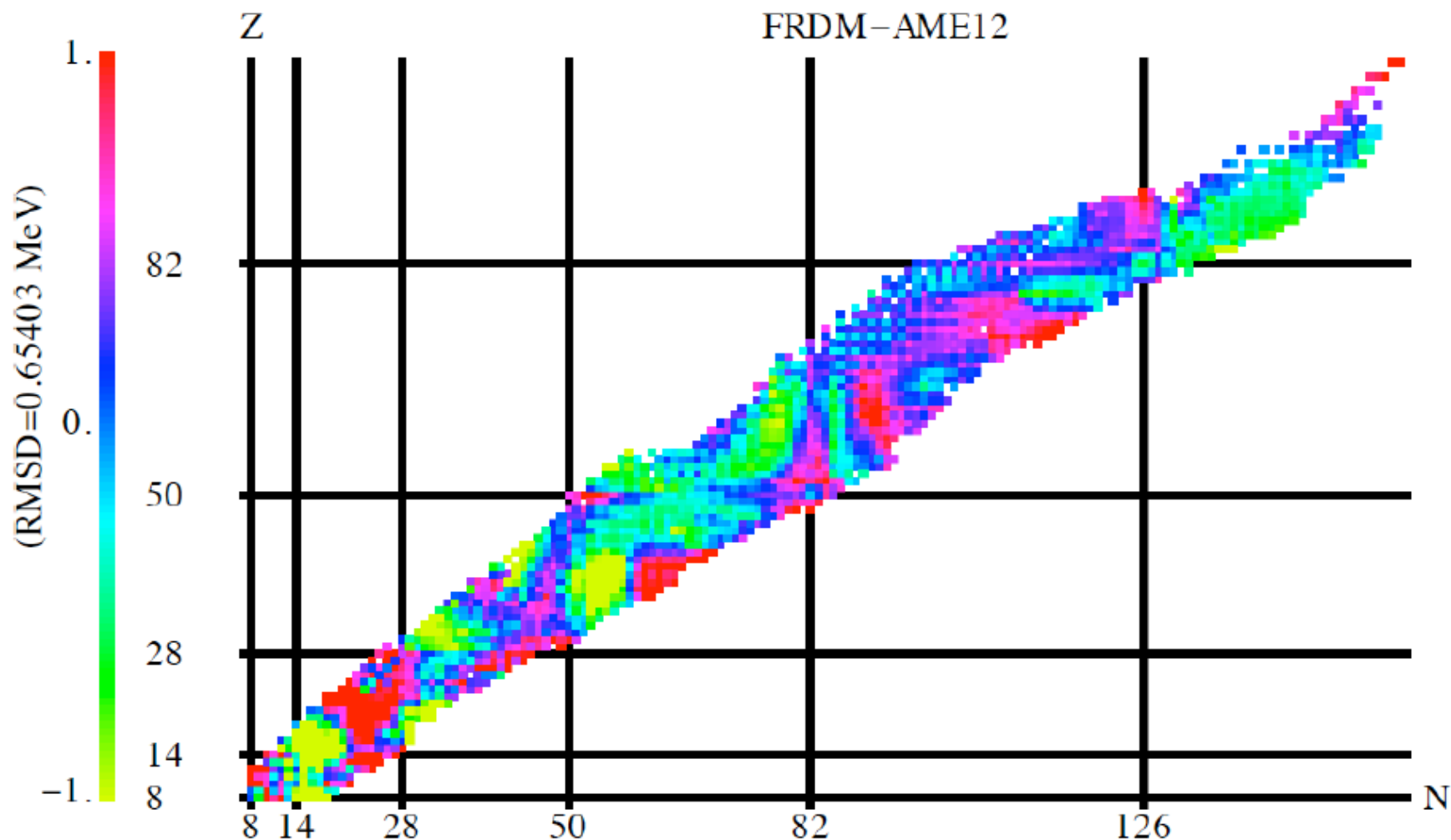
Dependence on mass model

© Martinez-Pinedo in INT workshop



Global mass models vs. Experiments

© Martinez-Pinedo in INT workshop



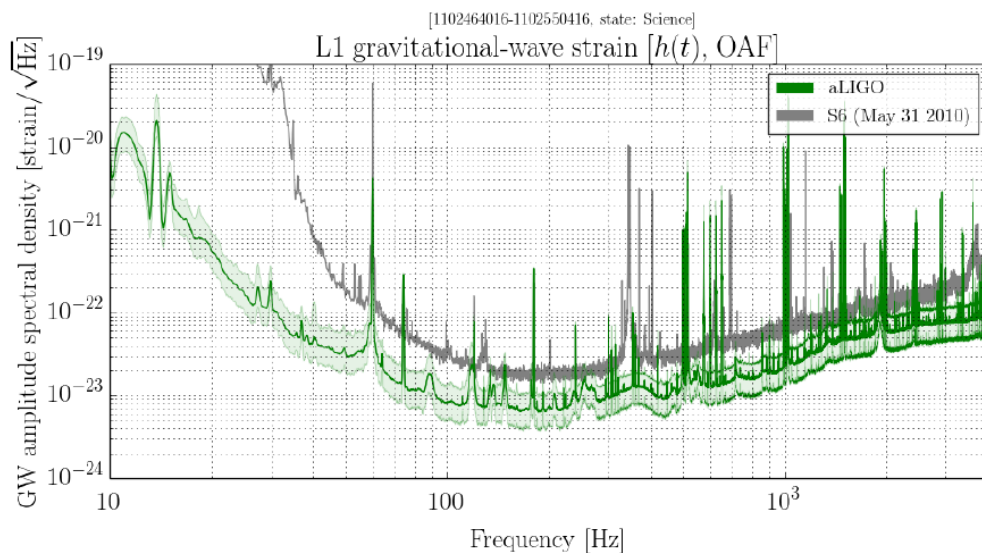
宇宙観測との連携：ポスト京時代(2016~2019)の状況

▶ 重力波観測

- ▶ KAGRA: 2017年度中に本格観測開始予定
- ▶ Advanced LIGO: 2015年後半から観測開始か？
 - ▶ **Inspiral phase: 現状ですでに約1.8億光年先まで観測可能！**

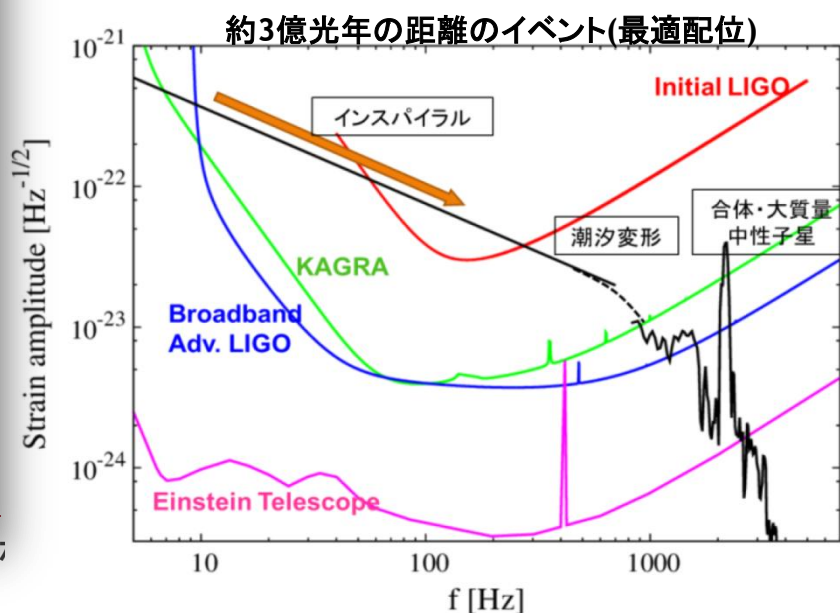
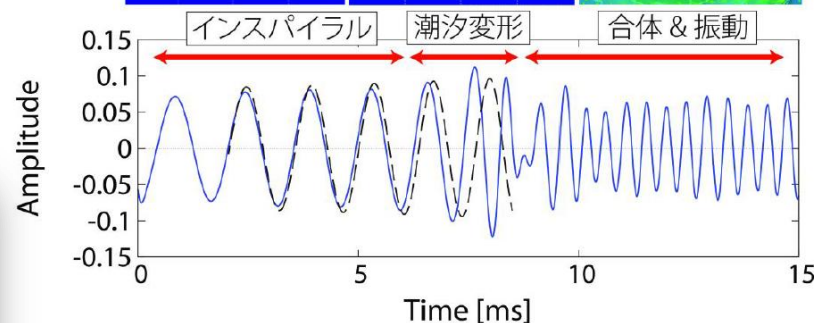
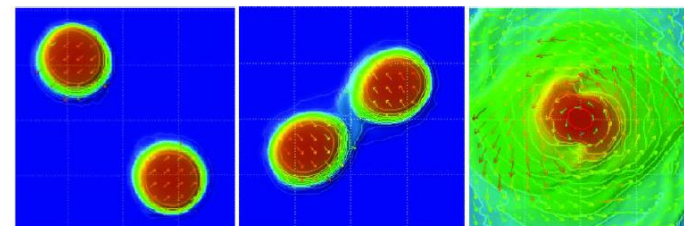
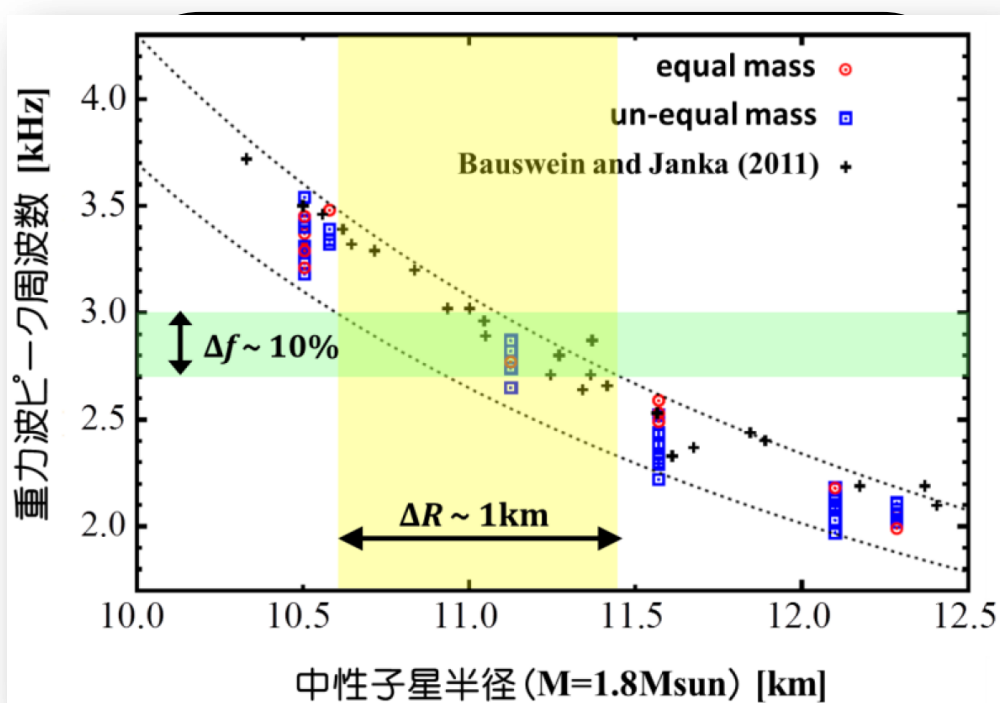


59Mpc lock during ER6



宇宙観測との連携：ポスト京時代(2016~2019)の状況

- ▶ コンパクト天体連星合体からの重力波の初観測
 - ▶ Inspiral phase はおそらく確実
 - ▶ 合体後の大質量中性子星からの重力波も運が良ければ



(原始)中性子星

▶ 超新星爆発コアバウン

- ▶ 質量 : $0.5 \sim 0.7 M_{\text{solar}}$
- ▶ 中心密度 : $1 \sim 2 \rho_{\text{s}}$

▶ canonical neutron star

- ▶ 質量 : $1.35 \sim 1.4 M_{\text{solar}}$
- ▶ 中心密度 : $\text{several } \rho_{\text{s}}$

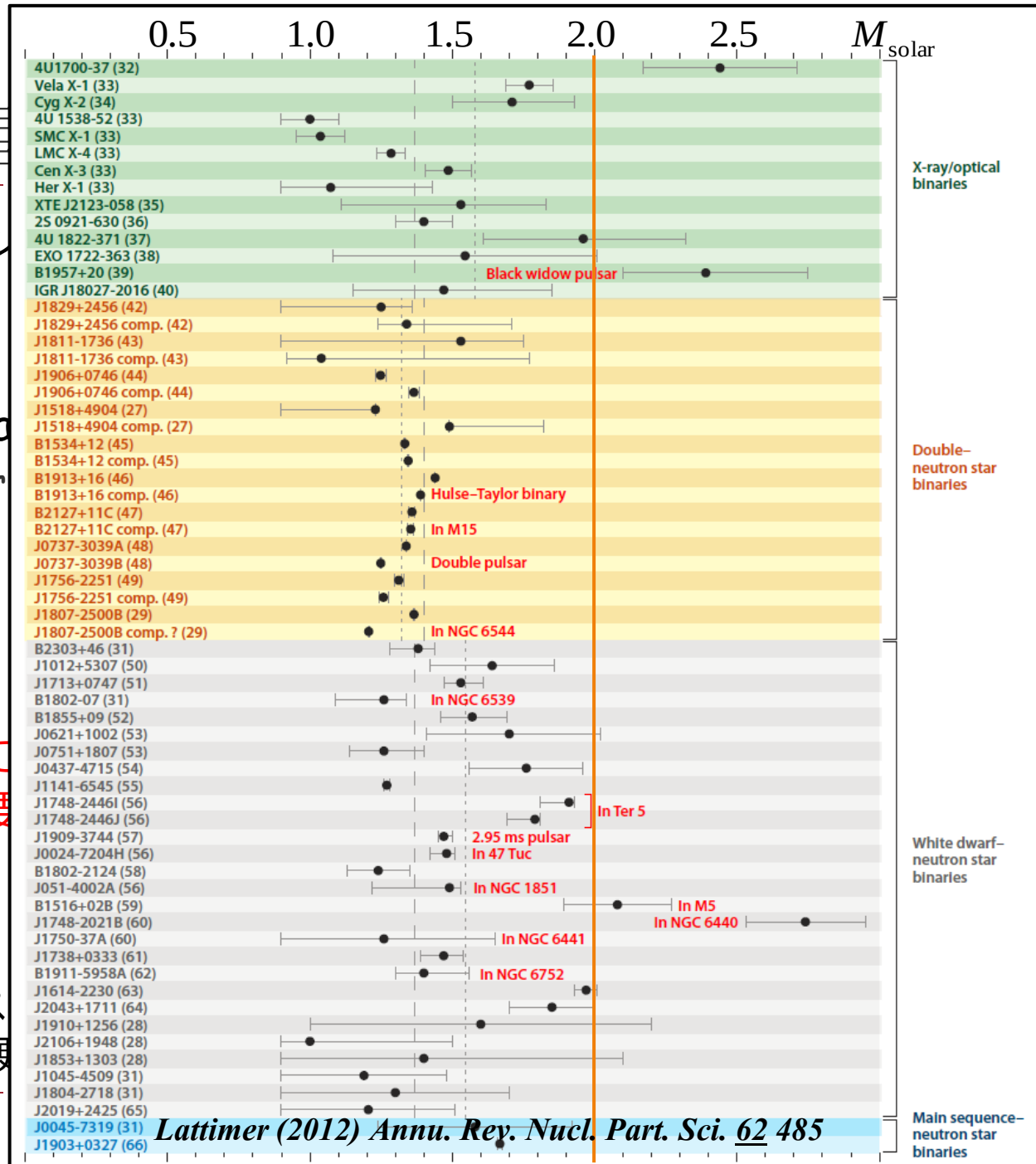
▶ 大質量中性子星

- ▶ 中心密度 : $> 4 \rho_{\text{s}}$

▶ 超高密度領域を探るには 大質量中性子星が必要

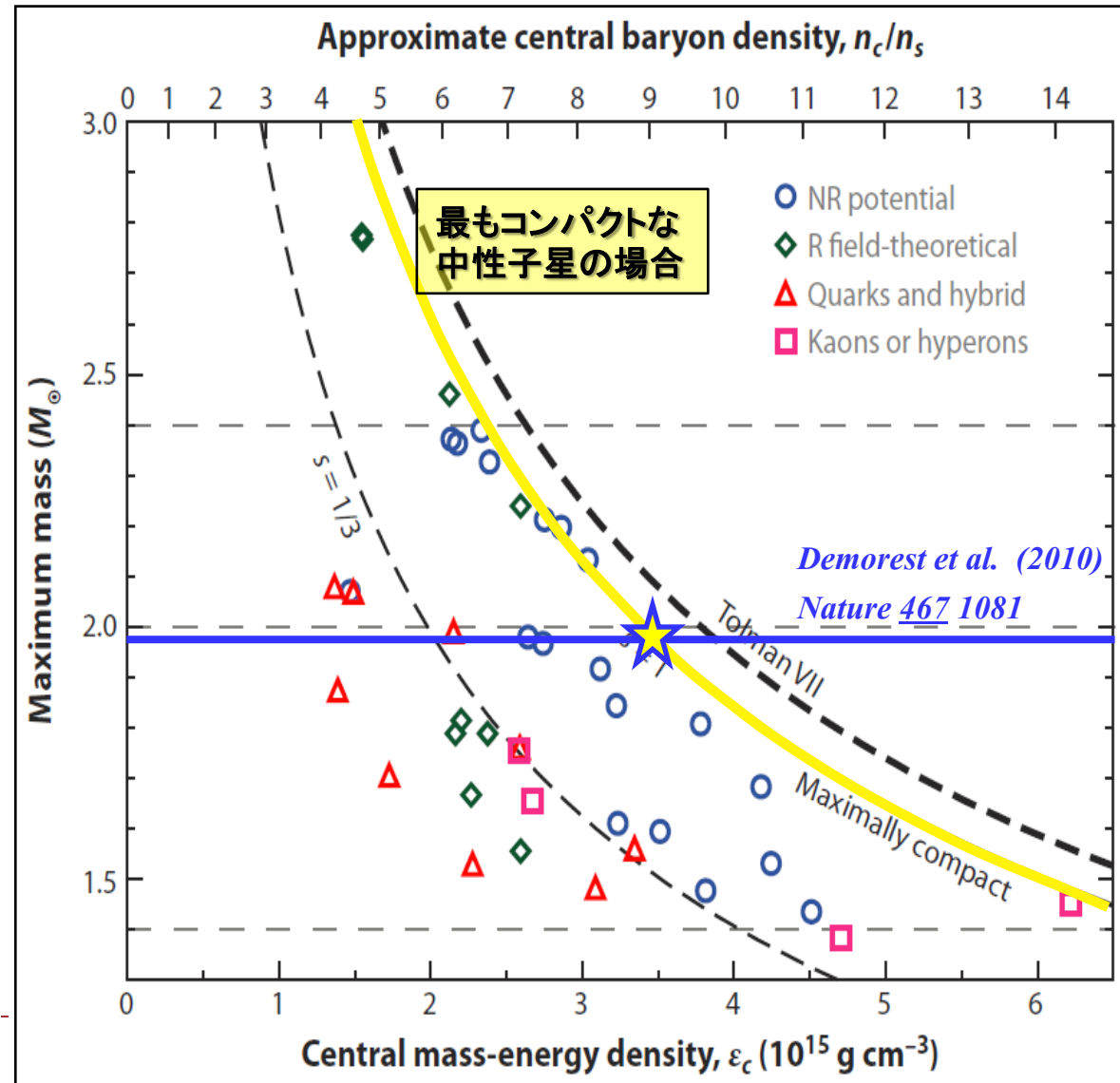
- ▶ 連星中性子星合体
- ▶ ブラックホール形成

▶ もし (2-4) ns でハイペ が出現するならEOSは硬



中性子星内部で達成される最高密度

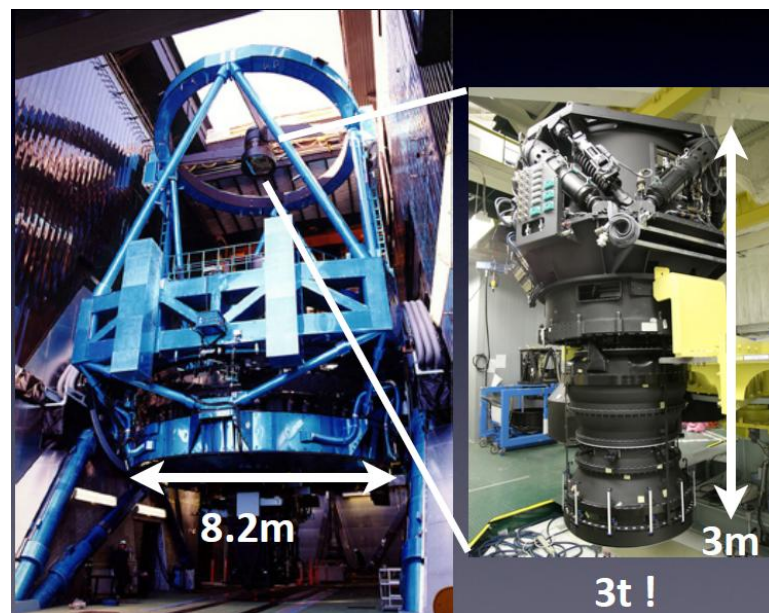
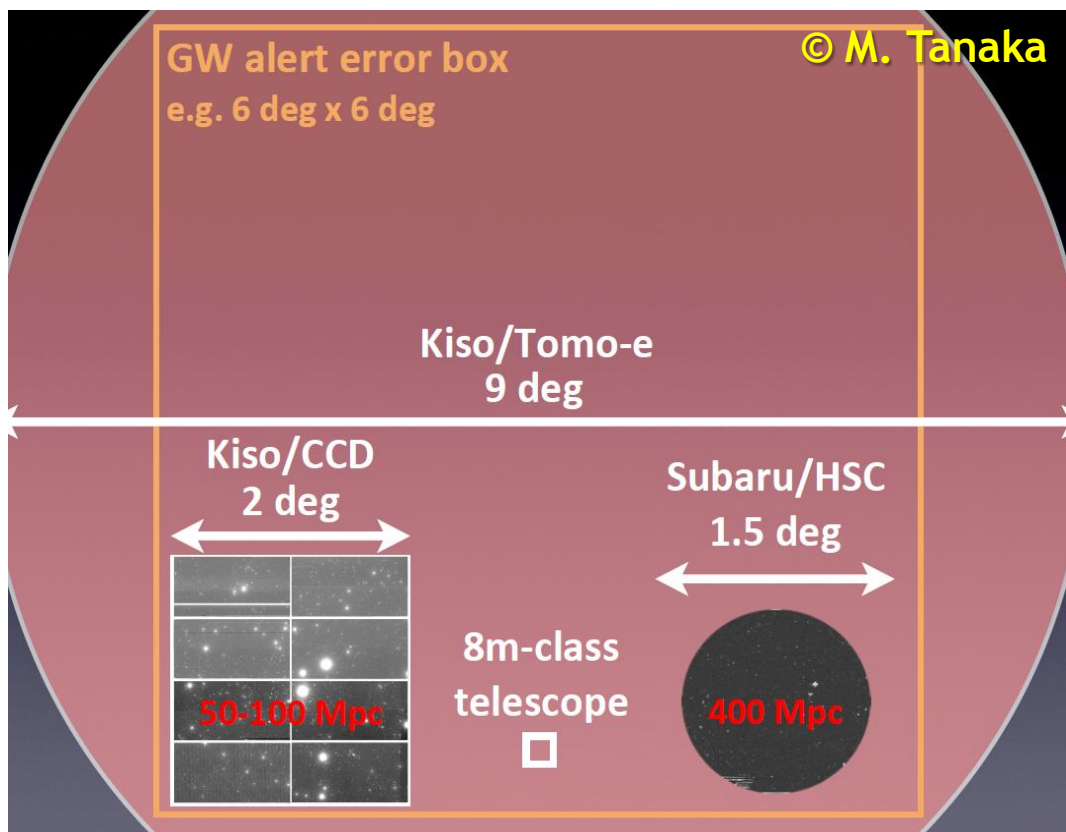
- ▶ 理論的に許される最もコンパクトな中性子星構造
 - ▶ 最も高い中心密度が達成
- ▶ 中性子星の最大質量 $\sim 2M_{\odot}$
- ▶ $n \sim 9n_s$ 程度まで
 - ▶ それより上はBH形成かあるいは ns collision など
 - ▶ relativistic mean field 系の「硬い」EOS では最高密度が低い
 - ▶ $2M_{\odot}$ NS を支える EOS は maximally compact に近い



宇宙観測との連携：ポスト京時代(2016~2019)の状況

▶ r-process 新星の観測

- ▶ KISS (KIso Supernova Survey) すでに自動化サーベイ中
 - ▶ Tomoe: 2017年からサーベイ観測開始予定
- ▶ Subaru HSC(Hyper Suprime-Cam) 2014年から運用開始



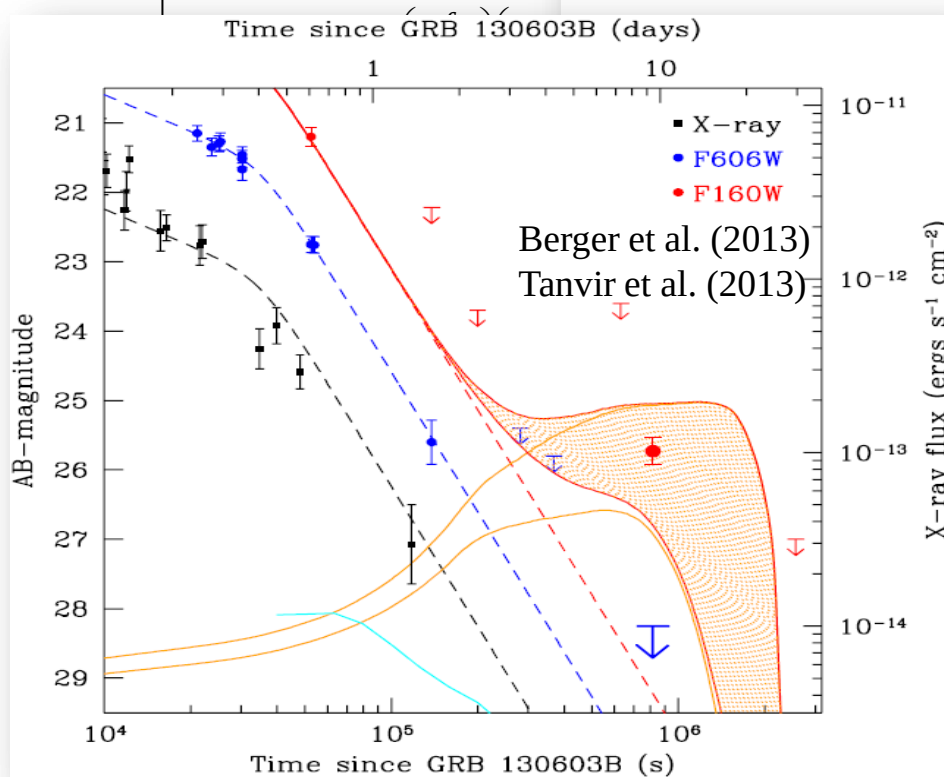
r-process 新星 / Kilonova / Macronova

- ▶ 連星合体における ejecta 中で合成されると期待されるr-process 元素の崩壊熱をエネルギー源とする可視・赤外域での放射
 - ▶ Li & Paczynski 1998; Metzger et al. 2010; Kasen et al. 2013; Tanaka & Hotokezaka 2013

$$t_{\text{peak}} \sim 10 \text{ days} \left(\frac{v}{0.3c} \right)^{-1/2} \left(\frac{M}{0.1 M_{\odot}} \right)^{1/2}$$

LETTER

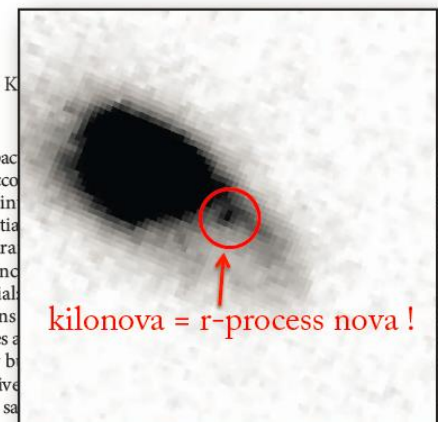
doi:10.1038/nature12505



Associated with the short-duration GRB 130603B

...ter³, J. Hjorth⁴, R. A. Hounsell³, K...

...e flashes of cosmic γ -rays, whose origin is unclear^{1,2}. The...duced by a relativistic jet...lar objects (specifically two...ck hole). This is supported...ties of their host galaxies³,...model is still lacking. Mer...ate significant quantities of...se decay should result in a...in the days following the...is mechanism may be the...elements in the Universe^{5,9}.

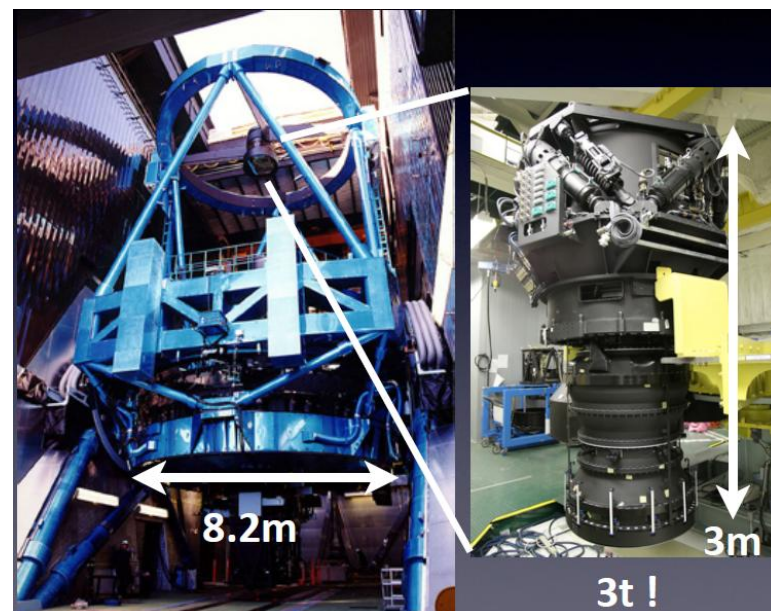
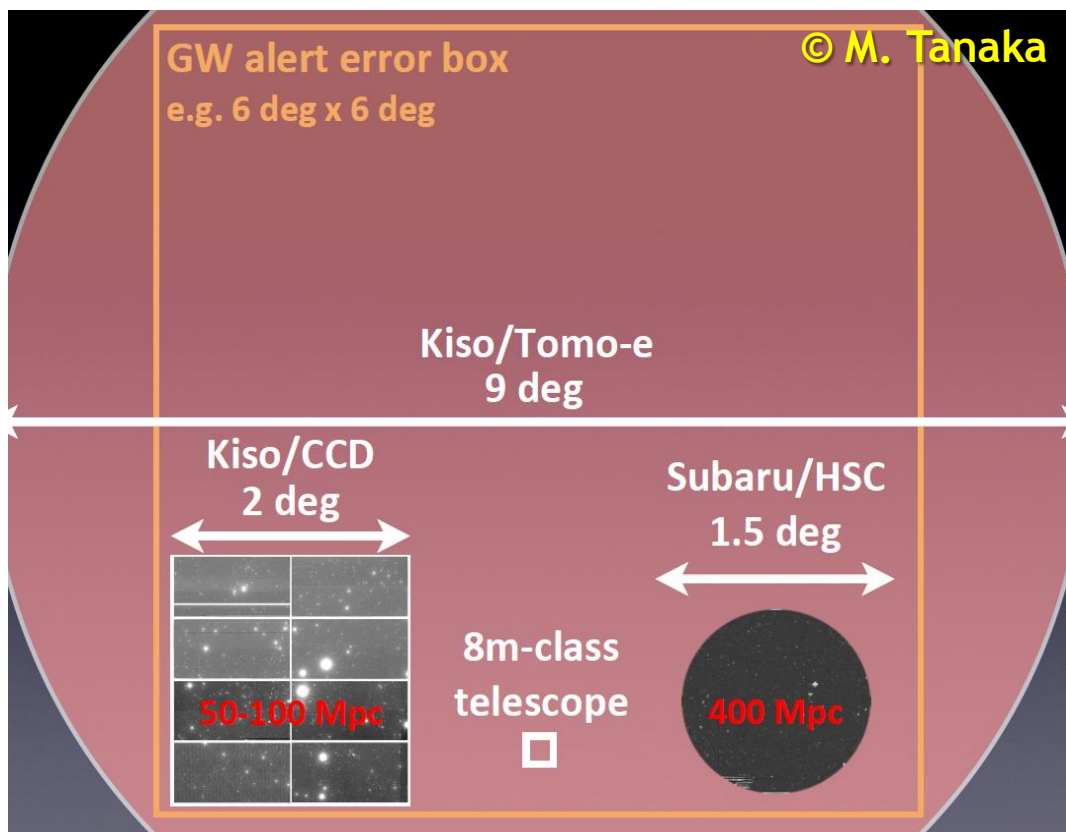


...neticsig...tational...arts is an...ts and to...ever, the...circum...axes, or...a, which...duration...ort-lived...NASA's...typically

重力波電磁波対応天体候補
c.f. neutrino first detection

宇宙観測との連携：ポスト京時代(2016~2019)の状況

- ▶ r-process 新星の観測 ⇒ 重力波による天文学の開拓
 - ▶ KISS (KIso Supernova Survey) すでに自動化サーベイ中
 - ▶ Tomoe: 2017年からサーベイ観測開始予定
 - ▶ Subaru HSC(Hyper Suprime-Cam) 2014年から運用開始

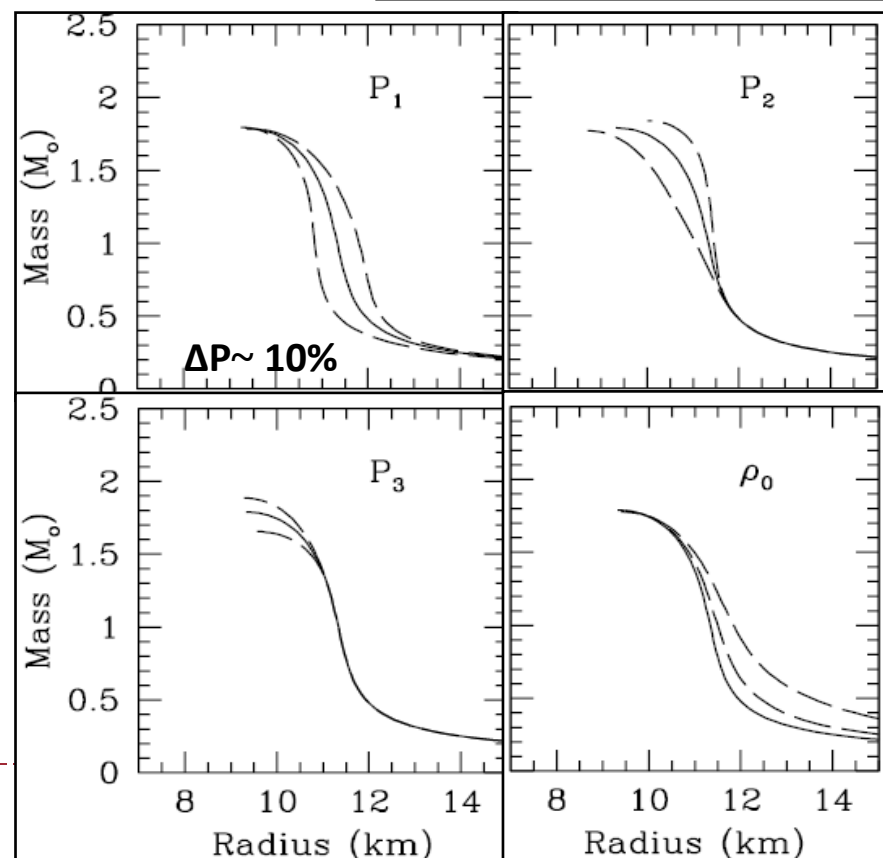
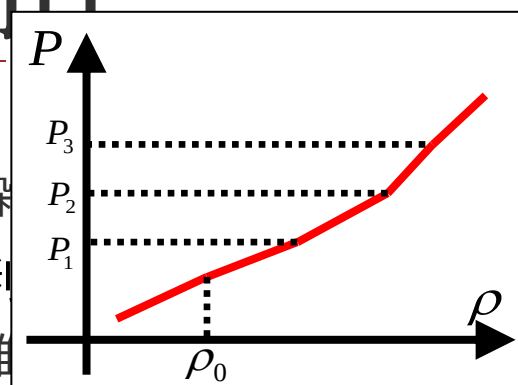


まとめ

- ▶ 数値相対論的輻射磁気流体シミュレーションによってコンパクト天体連星の合体・進化過程を解明
 - ▶ 質量放出過程 $\Rightarrow$ 元素合成 $\Rightarrow$ 元素の起源・宇宙の化学史
 - ▶ 重力波 $\Rightarrow$ + 電磁波対応天体の観測 $\Rightarrow$ 重力波天文学
 - ▶ 重力波によるEOSへの制限 vs. The EOS
 - ▶ ニュートリノ(現実的な距離では観測困難か)
- ▶ 必要な物理インプット
 - ▶ 状態方程式: 格子QCD計算による核力 + 量子多体計算
 - ▶ 中性子過剰核の特性
 - ▶ Nuclear mass
 - ▶ 種々の反応率
- ▶ 実験・観測との連携

連星合体からの重力波を用いる利点

- ▶ **シンプル** : 重力波～四重極公式
 - ▶ $\Leftrightarrow$ 電磁波学観測 (大気・クラスト組成、輻射輸送、複雑)
- ▶ **少ない不定パラメータ、特に質量** : 合体前波形の利点
 - ▶ $\Leftrightarrow$ 単独中性子星の光学観測 (距離、質量の不定性、複雑)
- ▶ **物質の動的応答** : 変形、振動
 - ▶ $\Leftrightarrow$ 単独中性子星 (静的)
- ▶ **多角的情報** :
 - ▶ 潮汐変形 :
 - ▶ 半径～(比較的)低密度領域の情報
 - ▶ 大質量中性子星の振動モード :
 - ▶ 高密度領域の情報
 - ▶ 最大質量 :
 - ▶ 最高密度領域の情報
 - $\Leftrightarrow$ 単独中性子星で重たいものはまれ



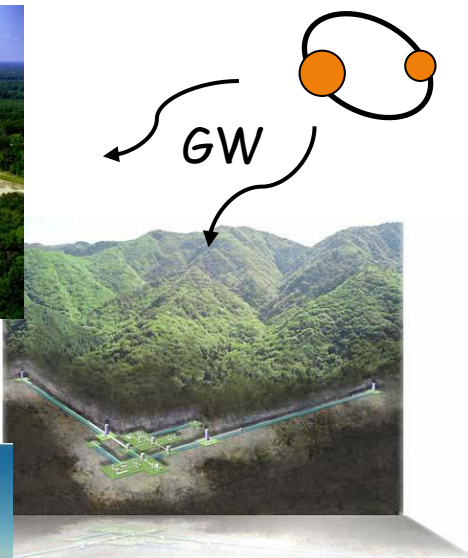
重力波天文学に向けて...



Advanced LIGO



Advanced Virgo



KAGRA

有望な波源 コンパクト天体連星の合体

- ▶ Expected event rate $\sim$ a few ~ 10 / yr
- ▶ 理論波形との matched filtering 解析
 - ▶ 膨大なパラメータ空間
- ▶ 電磁波対応天体の観測
 - ▶ パラメータ空間の縮減(実効的にS/N向上)
 - ▶ 発生時刻・位置(母銀河)決定
 - ▶ 電磁波観測を trigger とした解析
 - ▶ Multi-messenger confirmation
- ▶ 連星合体の観測がもたしうる情報
 - ▶ 高エネルギー天体现象との関連
 - ▶ 元素の起源、銀河の化学進化
 - ▶ 中性子星内部状態
 - ▶ 強重力場におけるGRテスト, ...etc

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

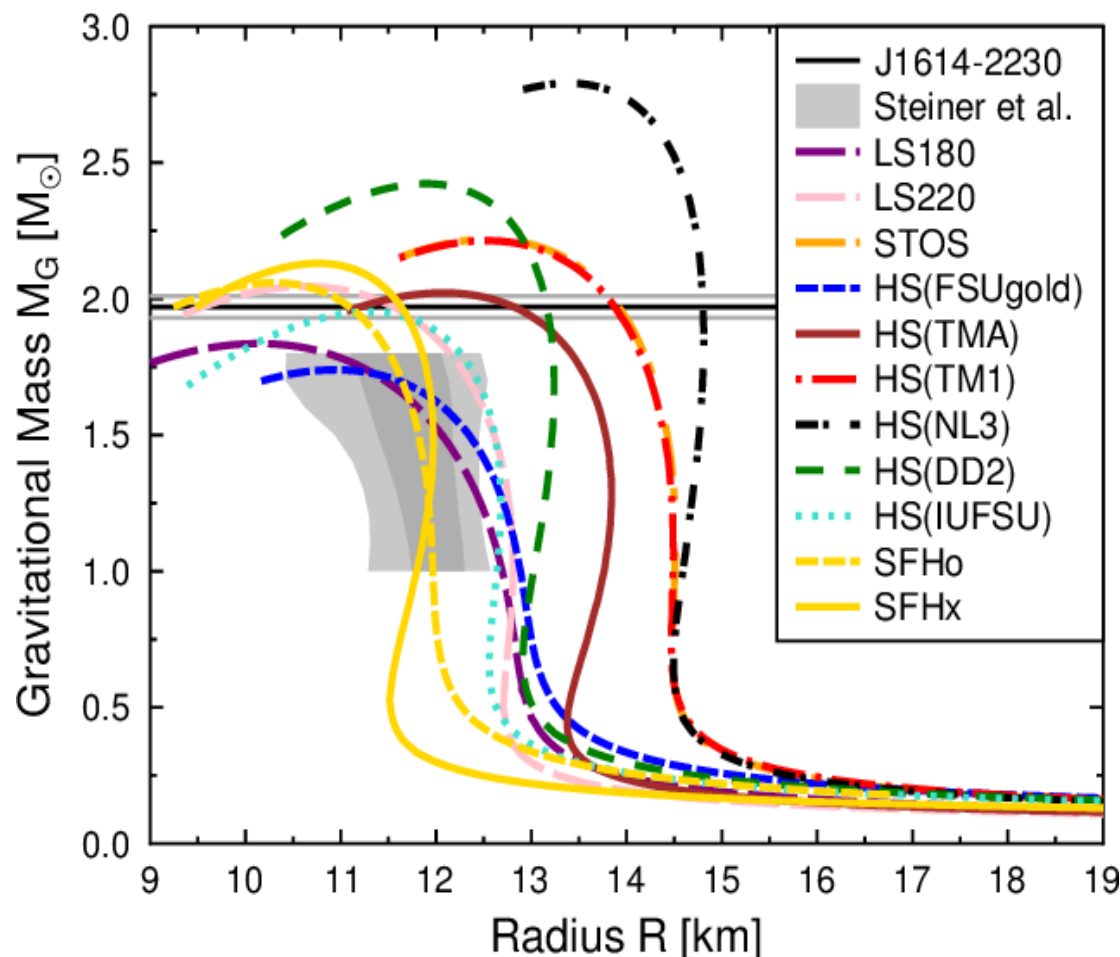
▶ IUFSU

▶ 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する



連星中性子星の合体と r-process 元素合成

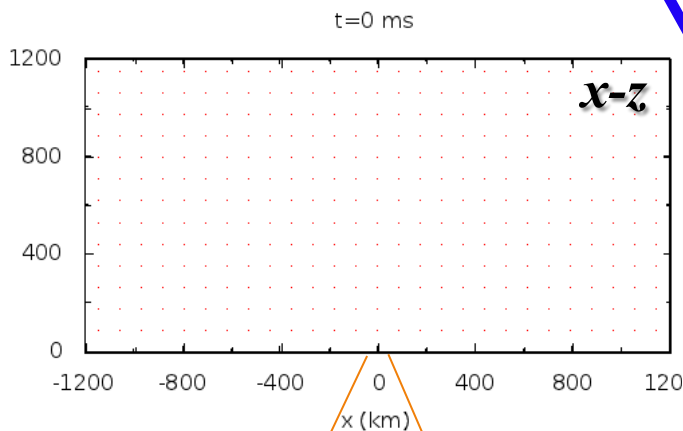
▶ Mass ejection from BNS merger : two components

▶ 潮汐破壊に伴う成分

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

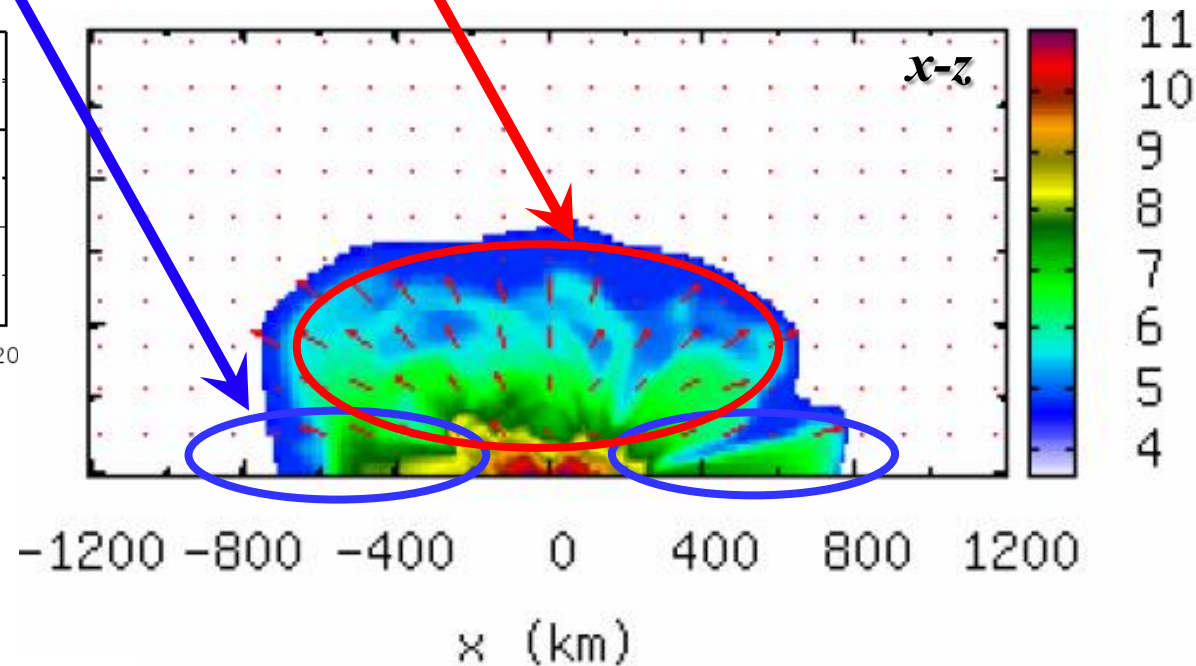
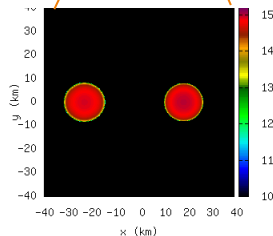
▶ 衝撃波加熱による成分

- 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 $Y_e \uparrow$)



animation by
Hotokezaka

27



質量放出の状態方程式(EOS)依存性

▶ ‘硬いEOS’

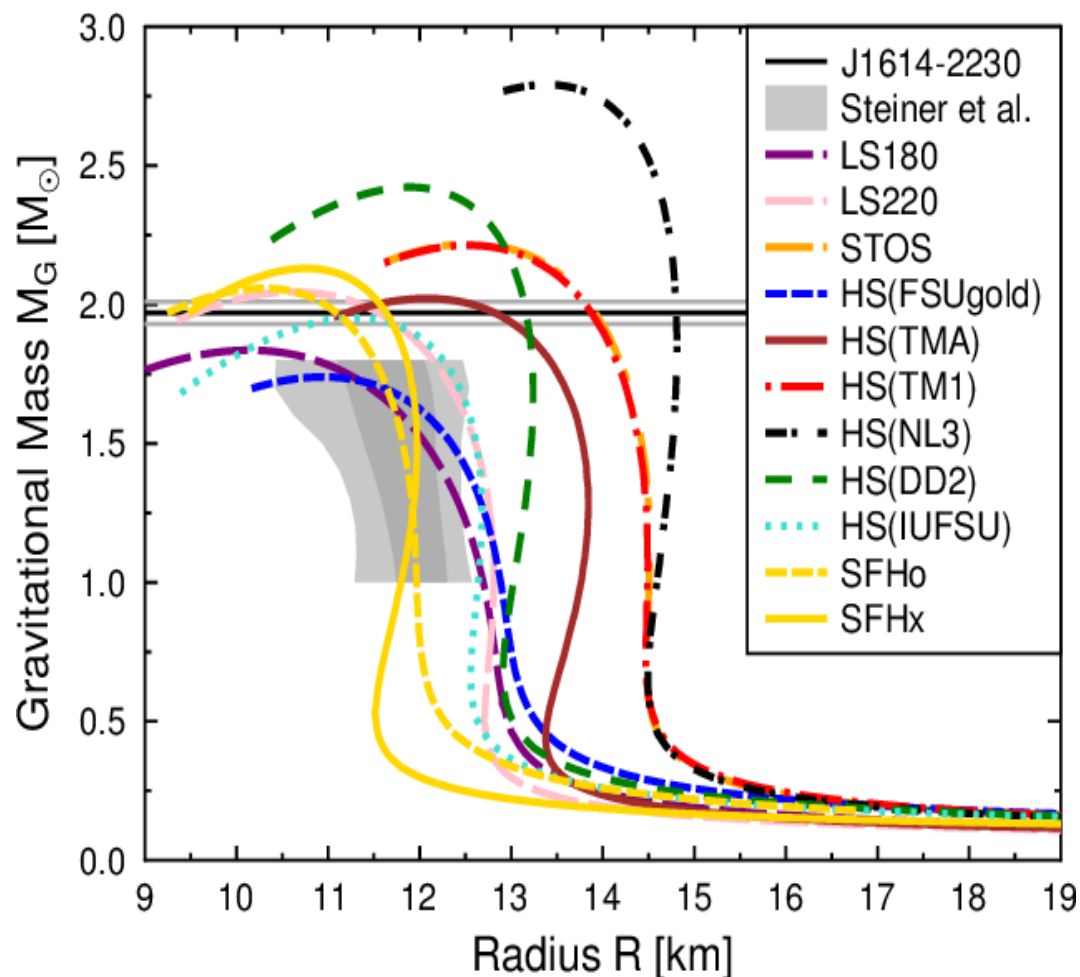
- ▶ **TM1**
- ▶ 中性子星半径: 大
- ▶ 潮汐破壊成分 dominant
- ▶ 冷たい中性子星物質 dominant (low Y_e)

▶ ‘柔らかいEOS’

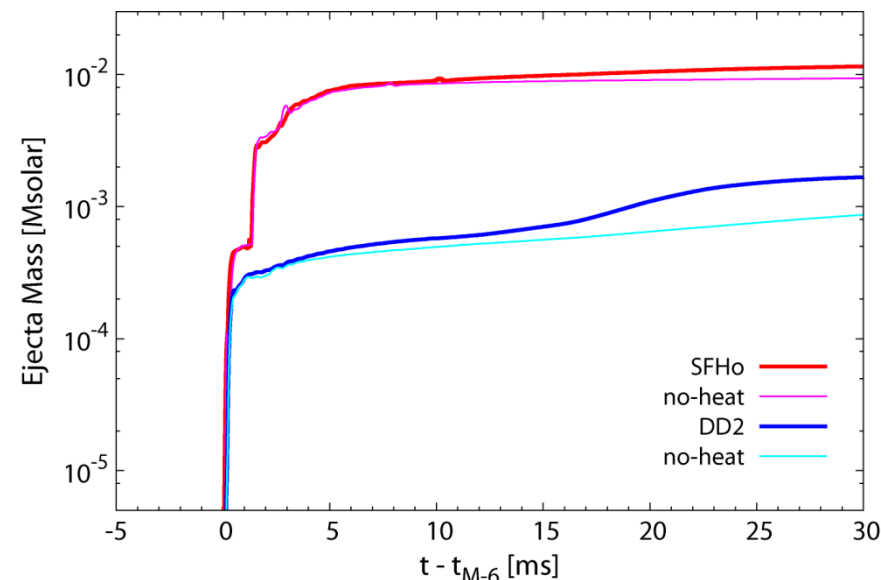
- ▶ **SFHo**
- ▶ 中性子星半径: 小
- ▶ 潮汐成分 less dominant
- ▶ 合体時高速、強い圧縮
- ▶ 衝撃波加熱成分 dominant

▶ ‘中間のEOS’

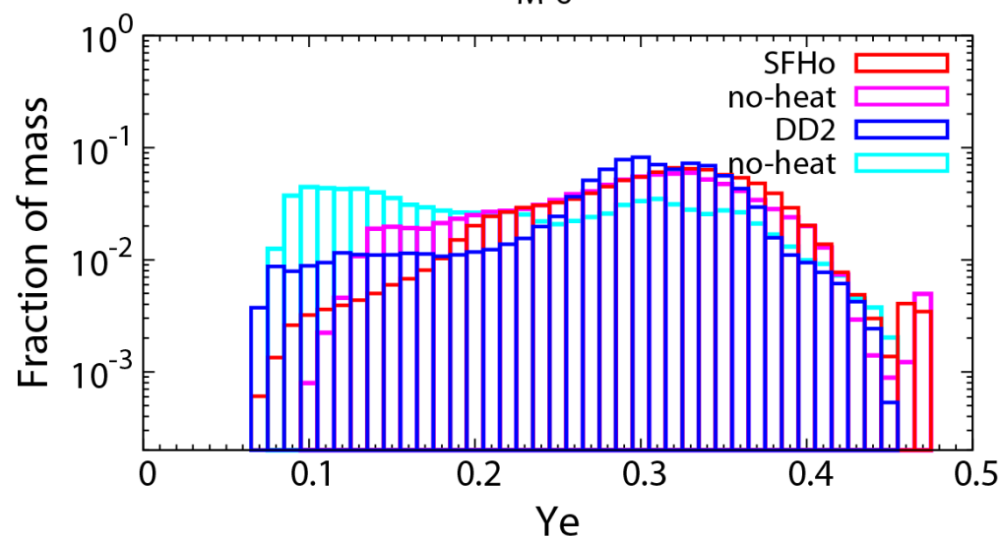
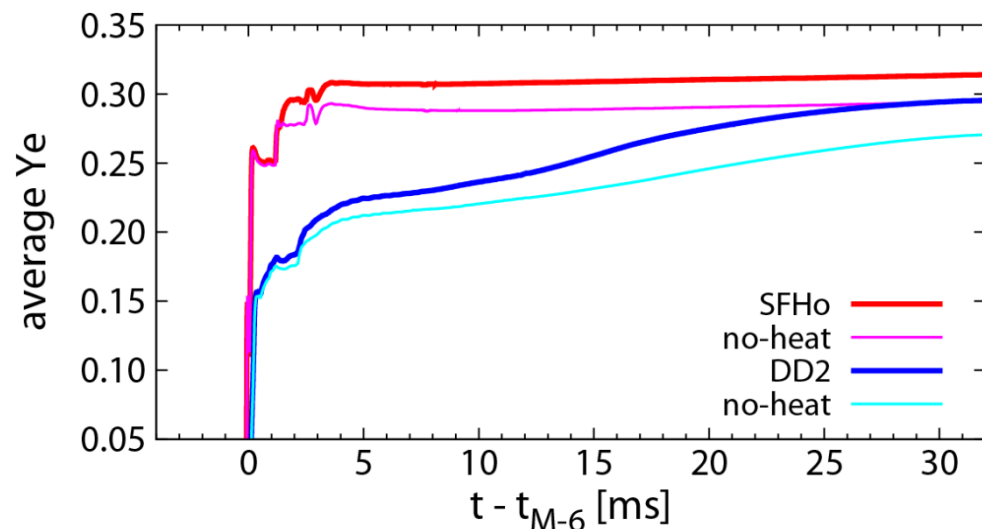
- ▶ **DD2**



2014年の成果(2)：ニュートリノの重要性

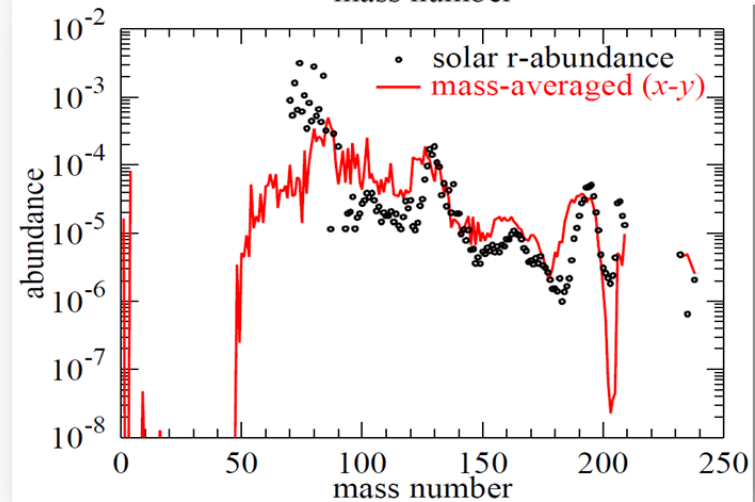
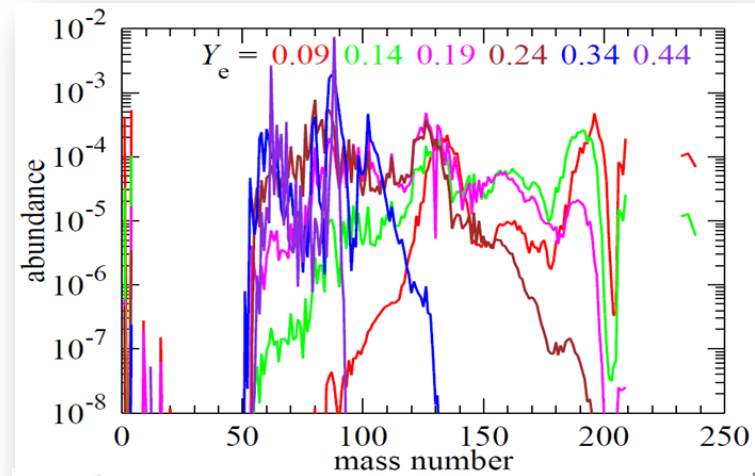
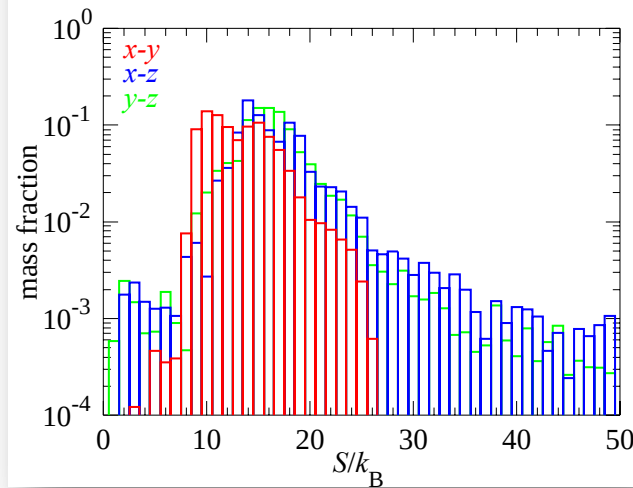
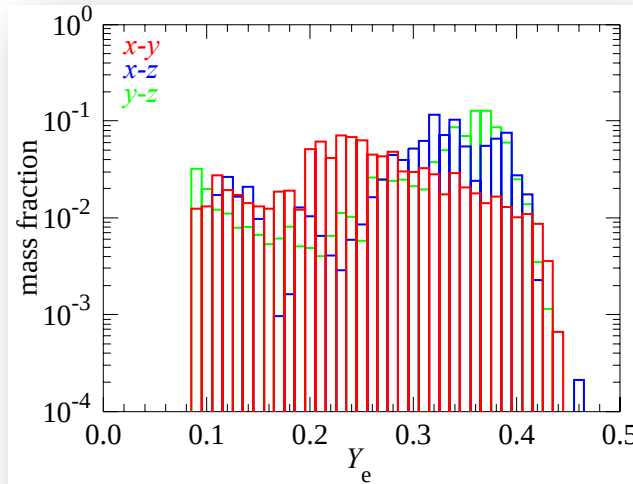


- ▶ Amount of ejecta mass can be increased $\sim 10^{-3}$ Msun
- ▶ Average Ye can change 0.02~0.03 depending on EOS : effect is stronger for stiffer EOS where HMNS survive in a longer time



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)