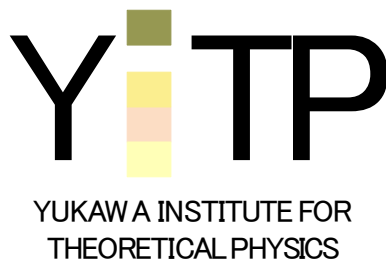
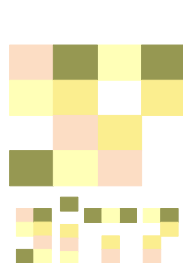


コンパクト連星合体数値相対論シミュレーションの現状と展望

木内建太 (京大基研)

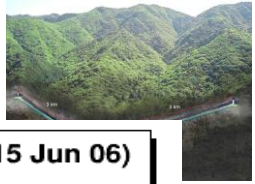
共同研究者：柴田大(京大基研)、関口雄一郎(東邦大)、久徳浩太郎(理研)

参考文献) Kiuchi et al. (2014, 2015a,b), Sekiguchi, KK et al. (2015,2016)



動機

重力波 = 時空の漣、Einsteinによって100年前に提唱
非常に微弱な信号; $h_c \sim 10^{-22} \sim$ 水素原子/1AU



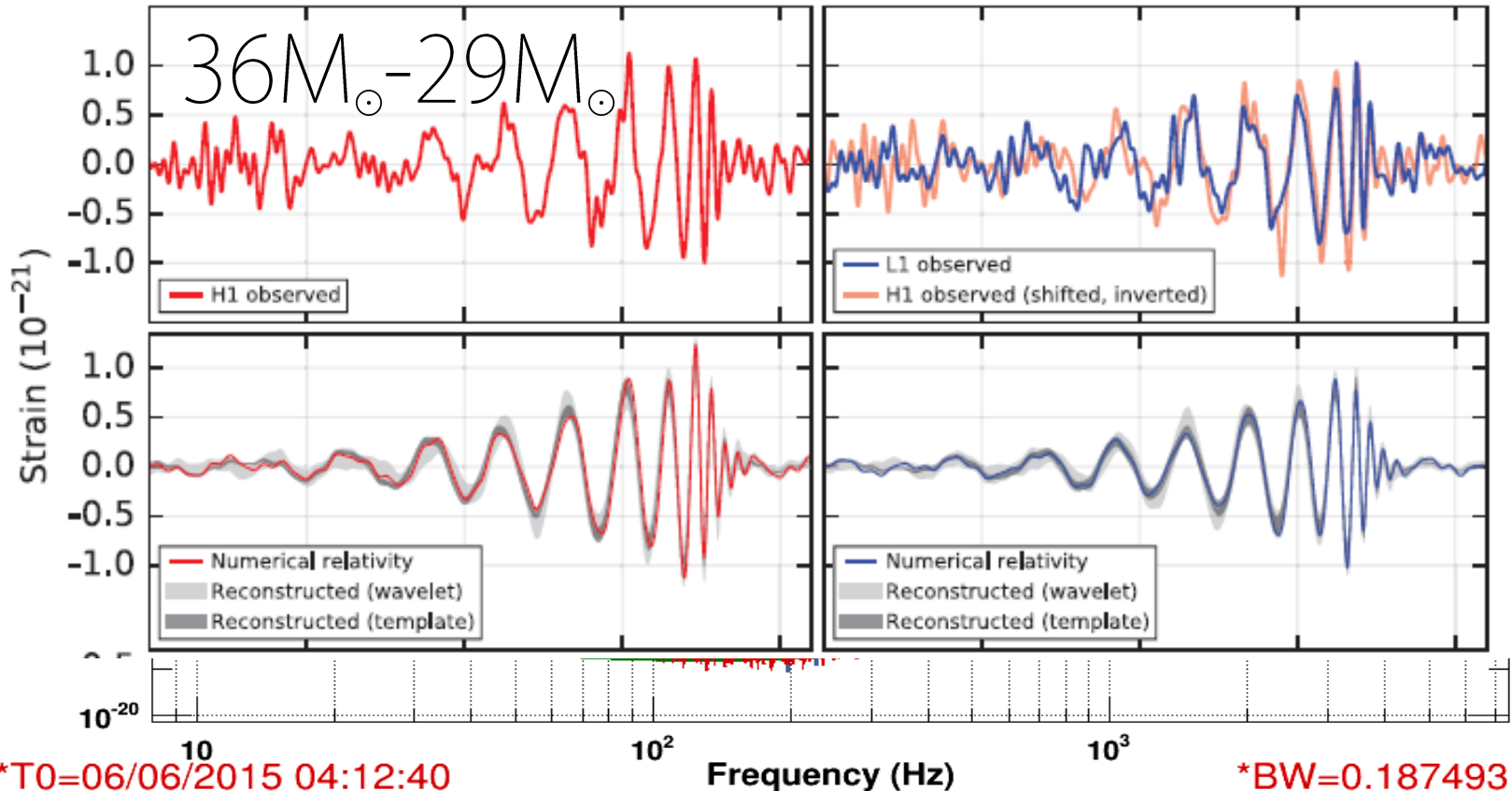
aLIGO DARM

H1: 24 W, 66 Mpc (2015 Jun 06)

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)

$36M_{\odot} - 29M_{\odot}$



KAGRA、Advanced LIGOは2017-18年度に本格観測開始予定
(Advanced LIGOは、9月-1月に試験運転)

BH-BH連星合体の次は何か？

▶ 強重力場での一般相対性理論の妥当性

▶ 中性子星物質の真の状態方程式

高密度物質の謎

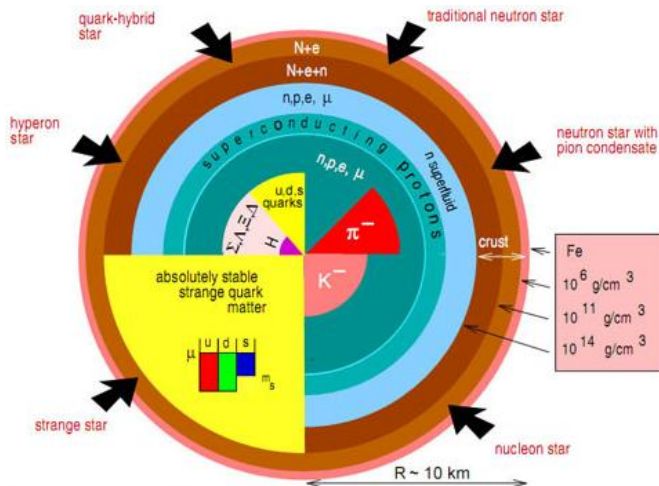
○ ハドロン物質, パイオン凝縮? ケーオン凝縮?

○ ハイペロン?

○ クォーク?

○ ストレンジネス?

中性子星の構造



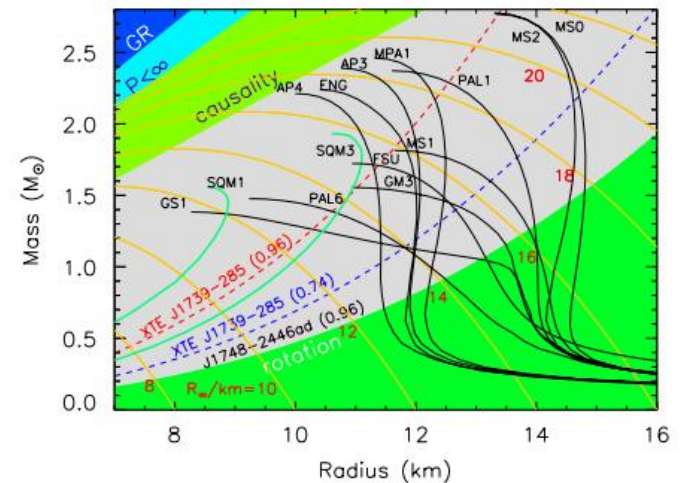
理論 (相対
論+核理論)



観測

質量一半径関係

(Lattimer & Prakash 07)



半径

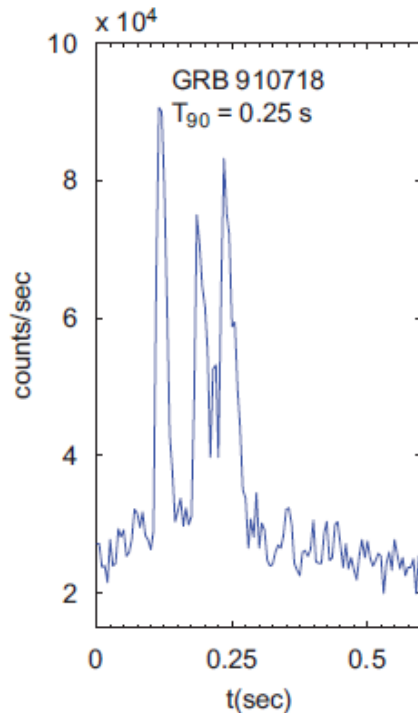
BH-BH連星合体の次は何か？（続き）

▶ 短ガンマ線バーストの中心動力源候補 (Narayan et al. 92)

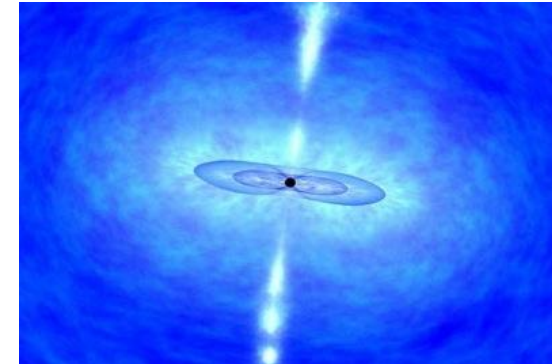
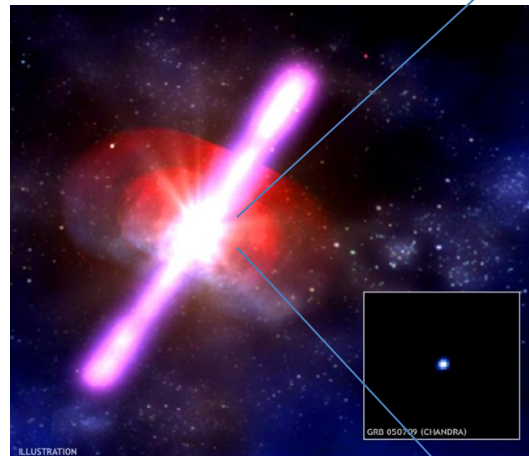
▶ $E_{\text{iso},\gamma} \sim 10^{49} - 10^{51}$ erg, 継続時間 $\sim 0.1 - 2$ s

莫大なエネルギーを短時間で放出 \Rightarrow 一般相対論的天体(中性子星／ブラックホール)が駆動？
ブラックホールー降着円盤？

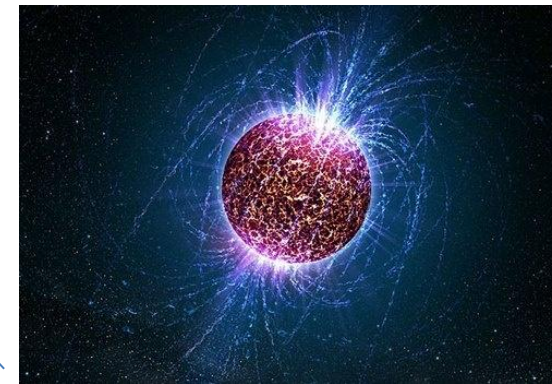
GRBの光度曲線



GRBのイメージ



マグネター？



BH-BH連星合体の次は何か？（続き）

- ▶ 金の合成現場？：速い中性子捕獲反応による元素合成サイトの候補 ⇒ 宇宙の重元素の起源



Colliding Neutron Stars
Produce Gold ?

候補天体としてのコンパクト連星合体 (Lattimer & Schramm 74)

- ▶ 大量の中性子過剰物質が放出
(連星中性子星合体: $M_{\text{eje}} \approx 10^{-4} - 10^{-2} M_{\odot}$, Hotokezaka et al. 13,
ブラックホール-中性子星合体: $M_{\text{eje}} \approx 10^{-6} - 10^{-1} M_{\odot}$, Kyutoku et al. 15)
- ▶ 速い中性子捕獲反応(R過程)による元素合成 (Wanajo et al. 14)

重力波源の電磁波対応天体

- ▶ R過程元素の放射性崩壊
キロノバ／マクロノバ (Li-Paczynski 98, Kulkarni 05, Metzger+10, Kasen et al. 13,
Barnes-Kasen 13, Tanaka-Hotokezaka 13, Berger et al.13, Tanvir et al. 13)

コンパクト連星合体の現実的な描像の解明が急務

(理論⇒観測への提言)

研究分野：数値相対論

4つの基本相互作用

- ▶ 重力相互作用 (General Relativity)
- ▶ 強い相互作用 (Nuclear matter)
- ▶ 弱い相互作用 (Neutrino)
- ▶ 電磁相互作用 (Magnetic field, cf. NS B-field 10^{11-15} G)

をセルフコンシステントに実装した数値シミュレーションによって、高エネルギー天体現象を理論的に解明する。

アインシュタイン方程式
$$R_{\mu\nu}(\partial^2 g_{\mu\nu}, \partial g_{\mu\nu}) - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

運動方程式 (流体、
輻射場、電磁場)

$$\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0, \quad T^{\mu\nu} = T_{(\text{fluid})}^{\mu\nu} + T_{(\text{rad})}^{\mu\nu} + T_{(\text{EM})}^{\mu\nu}$$

$$\nabla_\mu J^\mu = 0, \quad J^\mu = n_{(\text{baryon})}u^\mu, \quad n_{(\text{lepton})}u^\mu, \quad \text{etc}$$

核物質の状態方程式

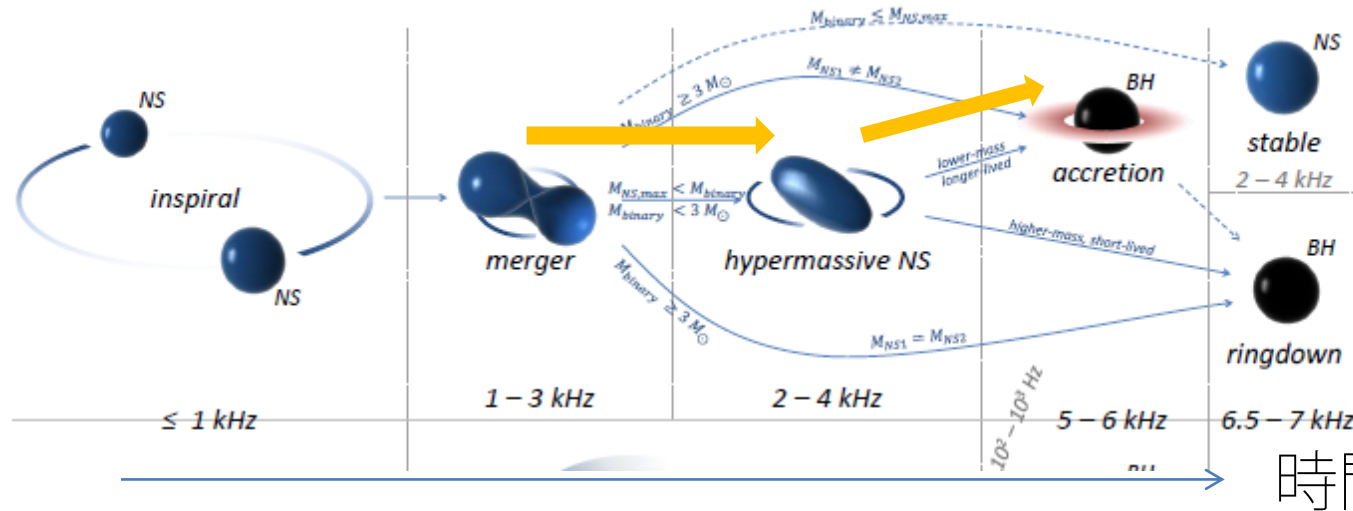
$$P = P(\rho, T, Y_e)$$

国際競争の現状



- ▶ 物理的詳細過程(磁場/ニュートリノ輻射)を省いた中性子星物質の状態方程式に関する系統的研究
- ▶ 磁気流体効果
- ▶ ニュートリノ輻射効果

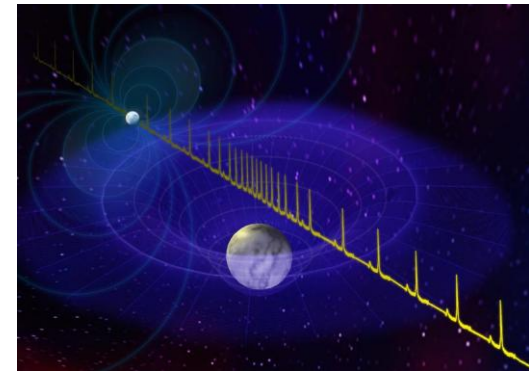
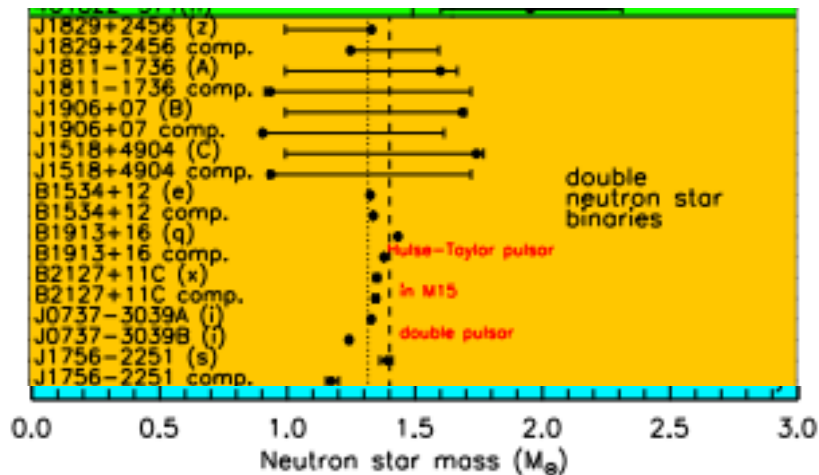
連星中性子星合体の概観 (Bartos et al. 13)



進化の過程は連星質量と中性子星の最大質量で決まる。

連星中性子星質量の観測値

PSR J1614+2230のシャピロ時間遅れ



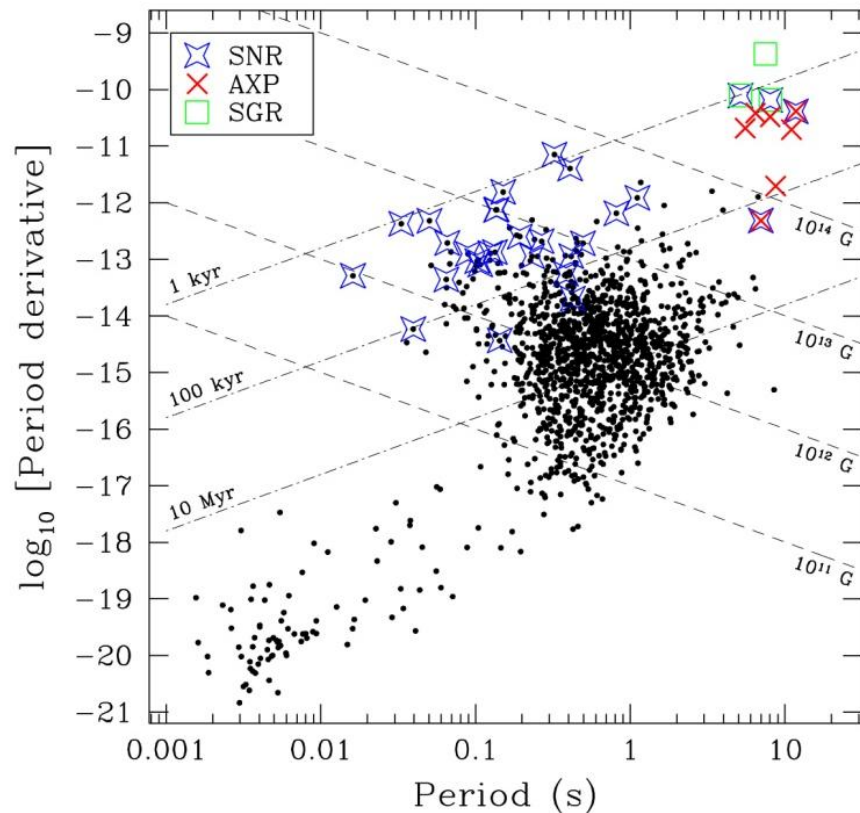
▶ 中性子星の最大質量 $2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$
(Demorest et al. 10, Antoniadis et al. 13)

(Lattimer & Paraksh 06)

より現実的なモデルの構築: 磁場の効果

▶ 磁場は中性子星の普遍的な特徴の一つ

$P - \dot{P}$ Diagram



磁気双極放射;

$$B_p \propto (P dP/dt)^{1/2}$$

⇒ ▶ $B_p \sim 10^{11-13} \text{ G}$ (電波パルサー)

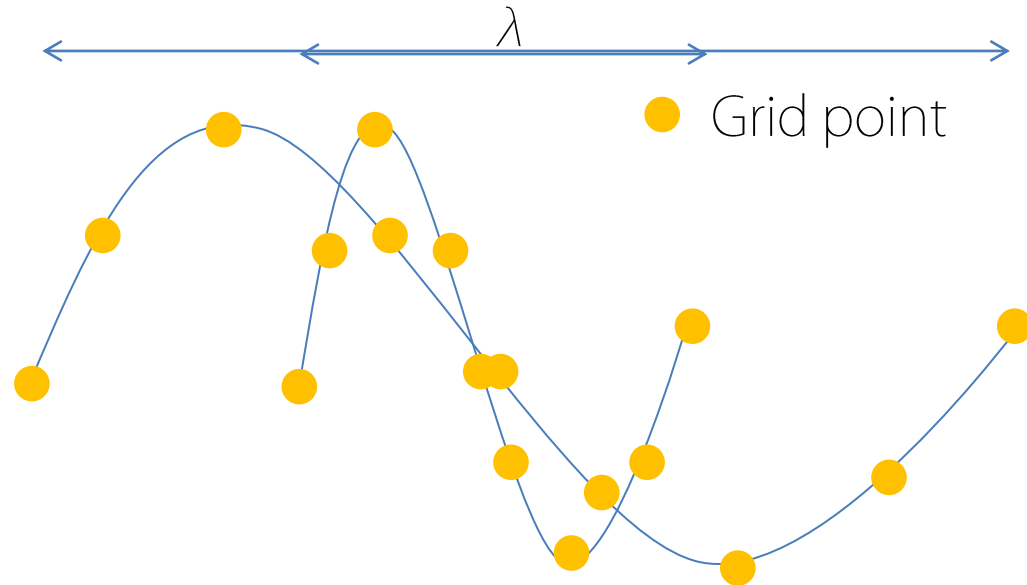
▶ $B_p \sim 10^{14-15} \text{ G}$ (マグネター)

連星中性子星合体における磁場が果たす役割は未解明だった

磁気流体シミュレーションの困難な点

- ▶ 磁気流体不安定モードの特徴：短波長かつ高い成長率
- ▶ 磁気乱流は数値粘性で散逸してしまう。

京コンピュータを使用した戦略プログラムのプロジェクトとして研究を遂行

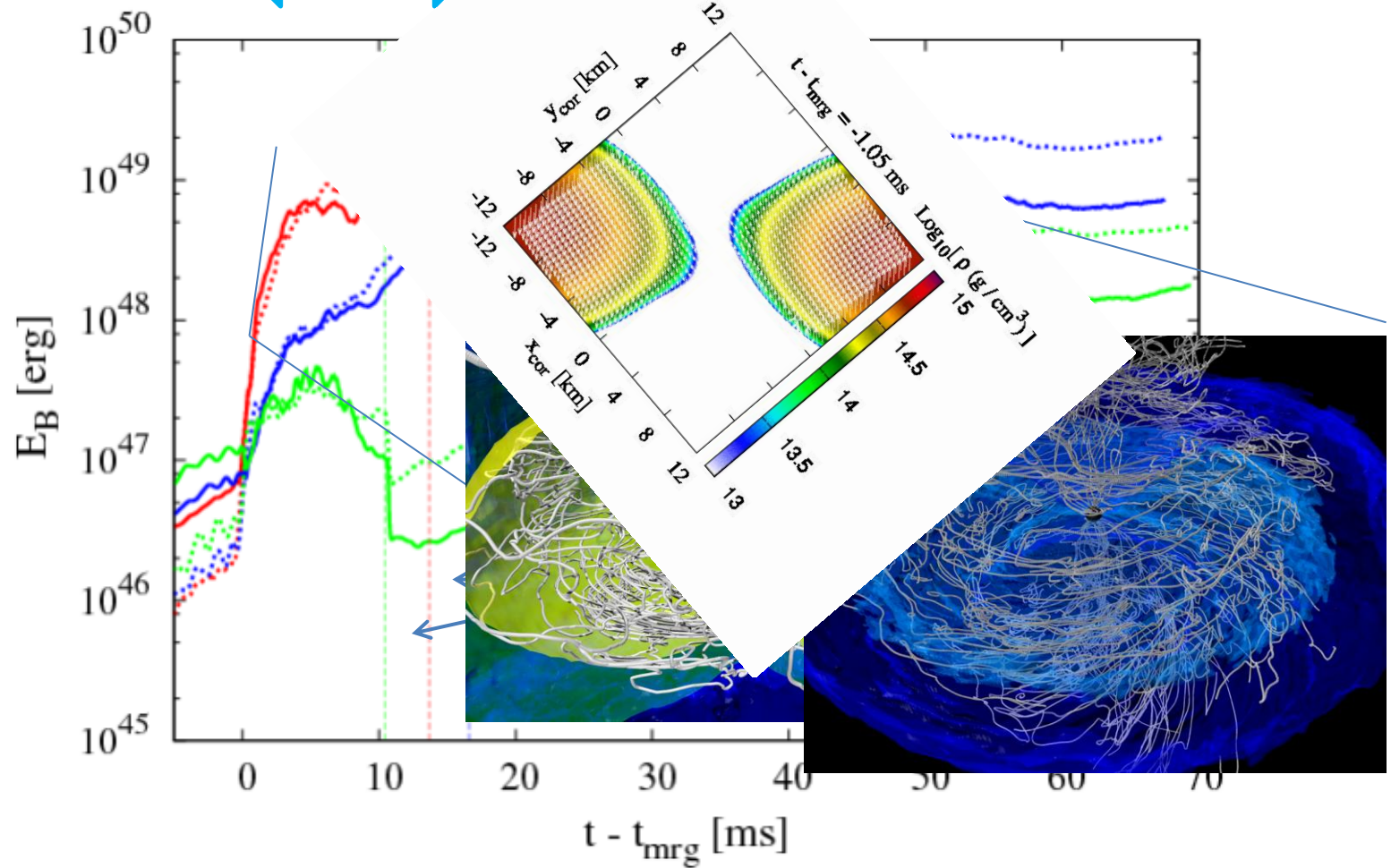


- ▶ 既存の研究より格子点数にして約100倍多い大規模シミュレーションを実行 (KK et al. 14, 15)

連星中性子星合体における磁場増幅 (ニュートリノの効果はなし) (Kiuchi et al. 14, 15a)

高速回転中性子星

マールー降着円盤

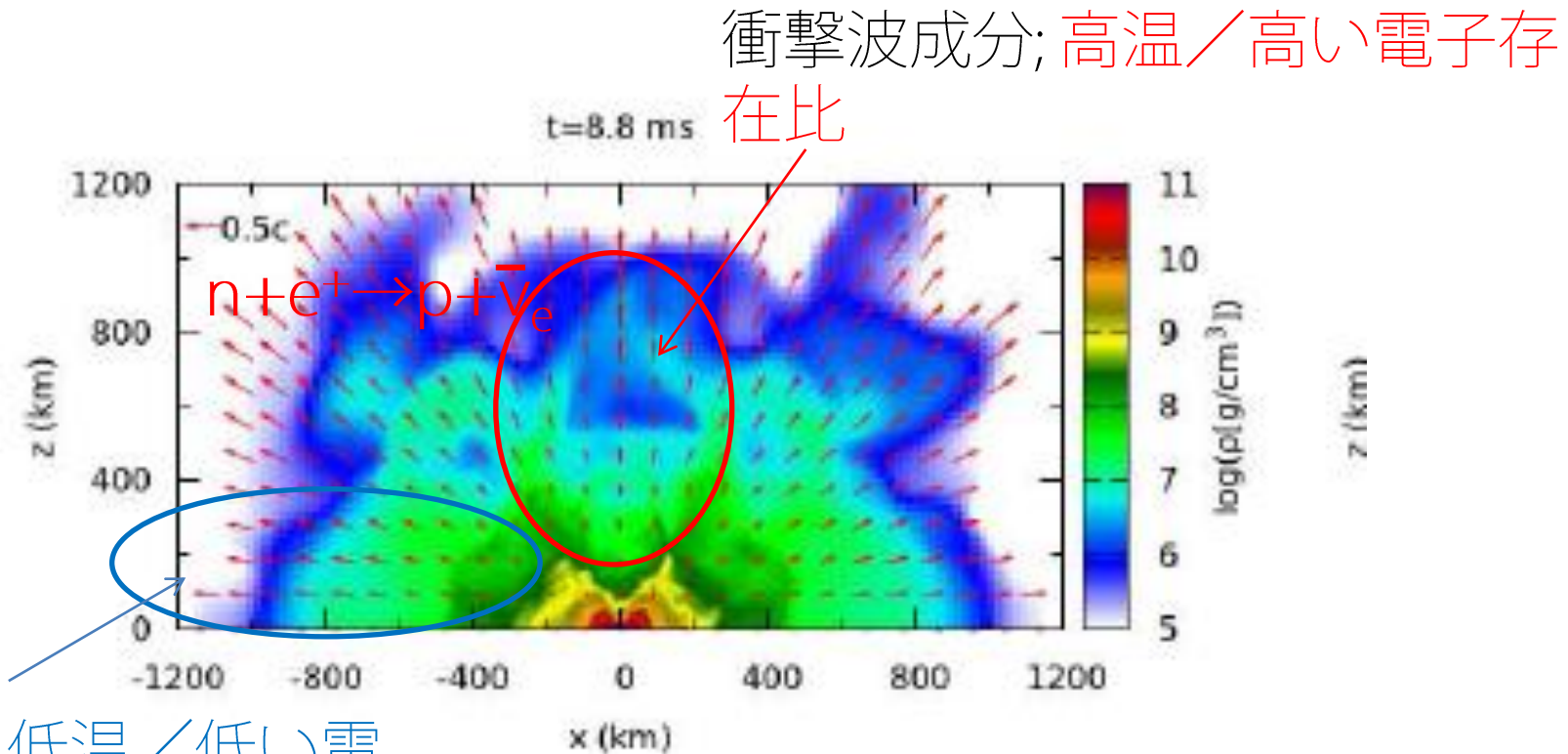


- ▶ ケルビン-ヘルムホルツ不安定性による磁場増幅
- ▶ 磁気回転不安定性による磁場増幅、 $\nabla \Omega < 0$, 成長率 $\sim \mathcal{O}(\Omega)$

より現実的なモデルの構築; ニュートリノ輻射場の効果

R過程による元素合成の予言に非常に重要、特に電子存在比（電子数／バリオン数）のプロファイル

合体後の子午面における密度場 (Hotokezaka et al. 13)



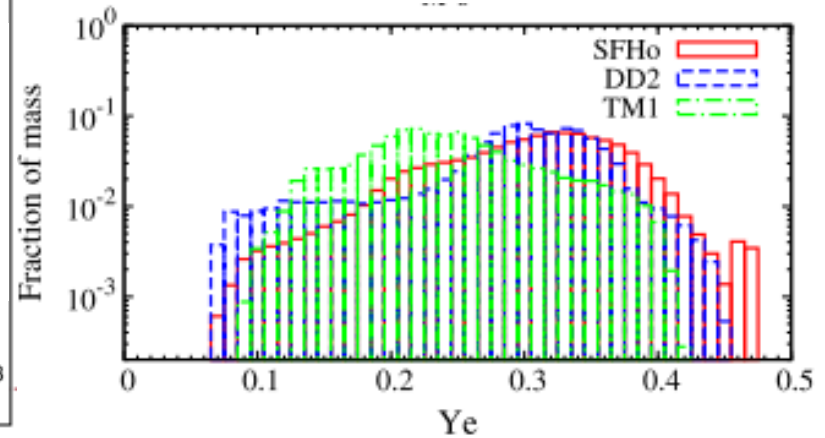
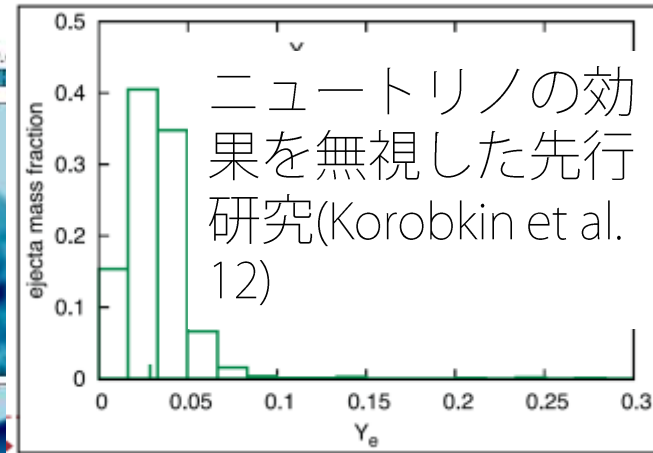
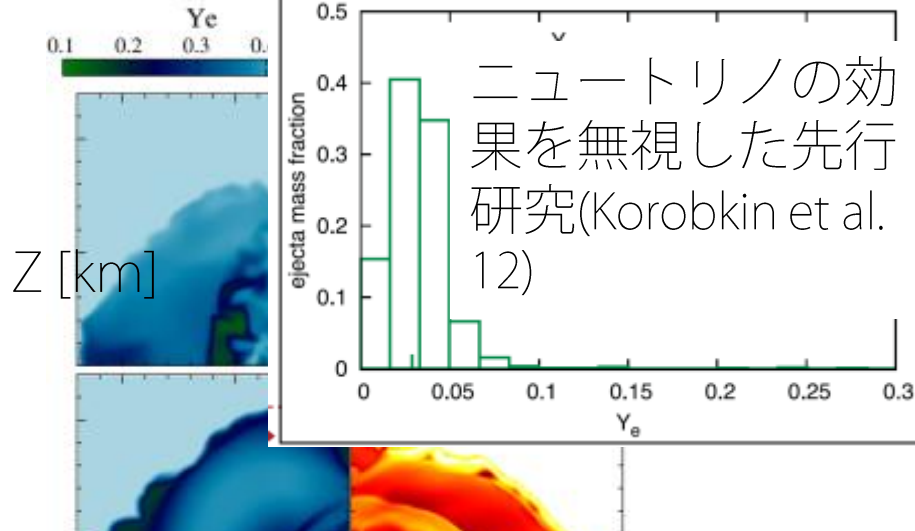
連星中性子星合体のニュートリノ輻射輸送シミュレーション (磁場の効果はなし) (Sekiguchi, KK et al. 15, 16, Wanajo et al. 14)

状態方程式 : SFHo (Steiner et al. 2013), 質量 : $1.35-1.35M_{\odot}$

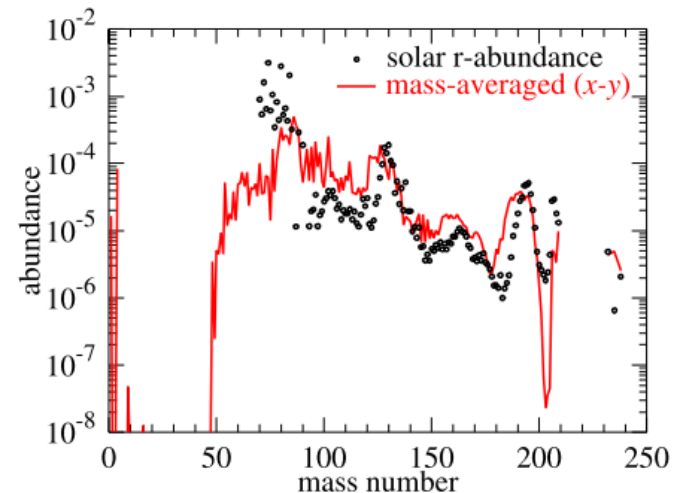
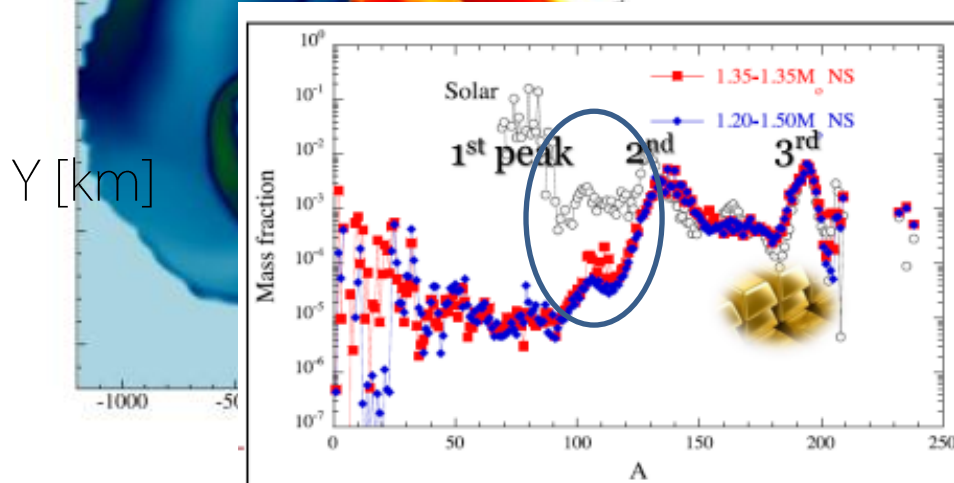
電子存在比

マントルコア

電子存在比の質量ヒストグラム

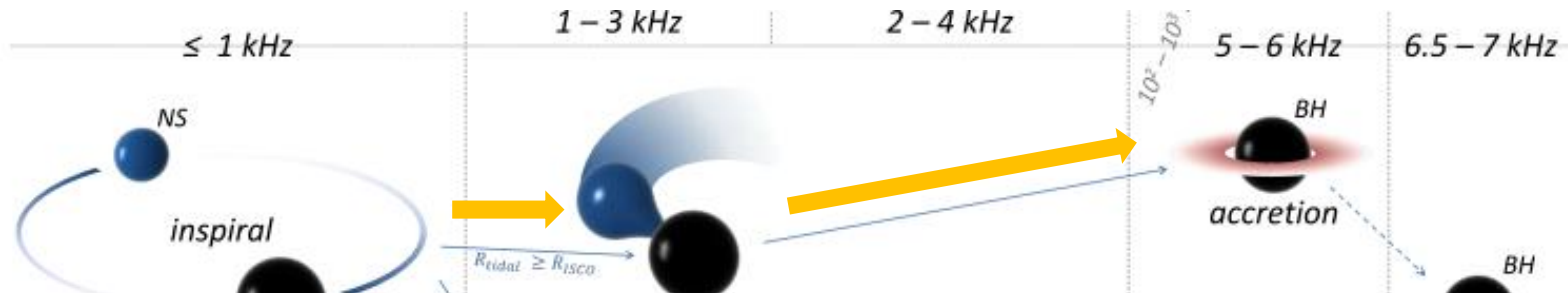


R過程元素合成



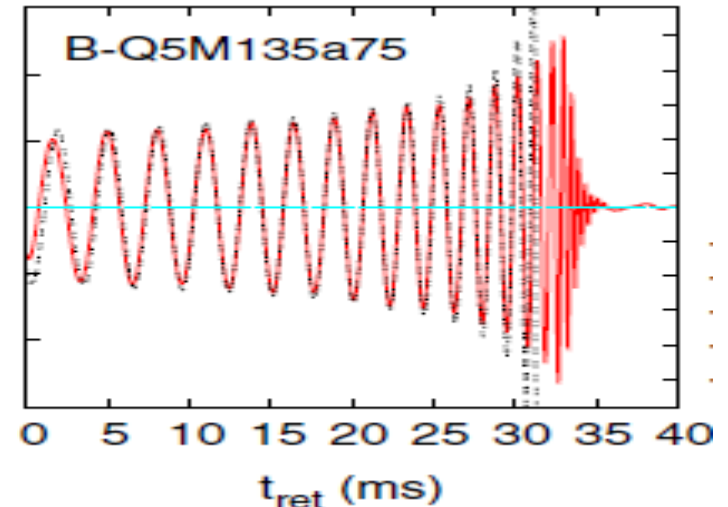
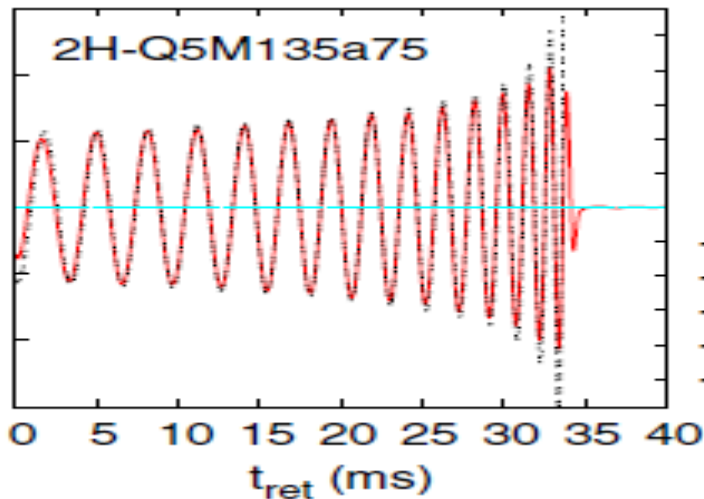
ブラックホールー中性子星合体の概観

Q: 潮汐破壊が起こるか? (質量比, ブラックホールスピン, 状態方程式)

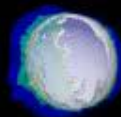


ブラックホールー中性子星連星合体の世界最高解像度
磁気流体シミュレーションを京で実行 (KK et al. 15a)

重力波 (Kyutoku et al. 11) → 時間



$t = 0.2270 \text{ ms}$



10^{12} g/cm^3

10^{11} g/cm^3

10^{10} g/cm^3

10^9 g/cm^3

$t = 0.0000$ ms



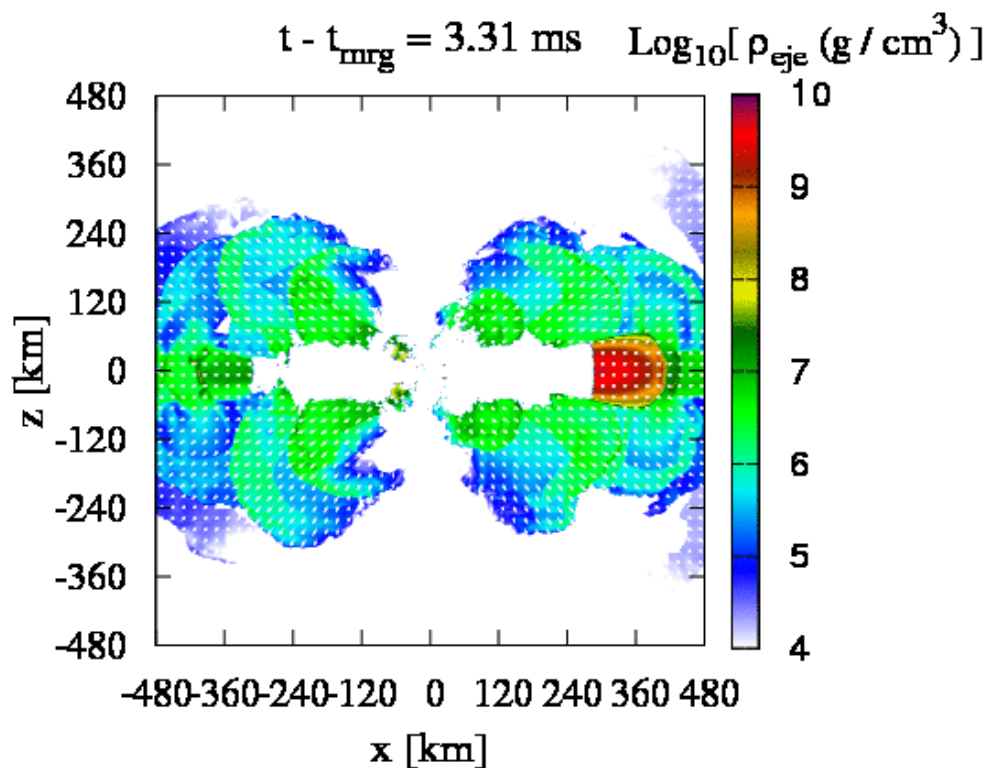
$10^{14.0}$ G

$10^{14.5}$ G

$10^{15.0}$ G

降着円盤風

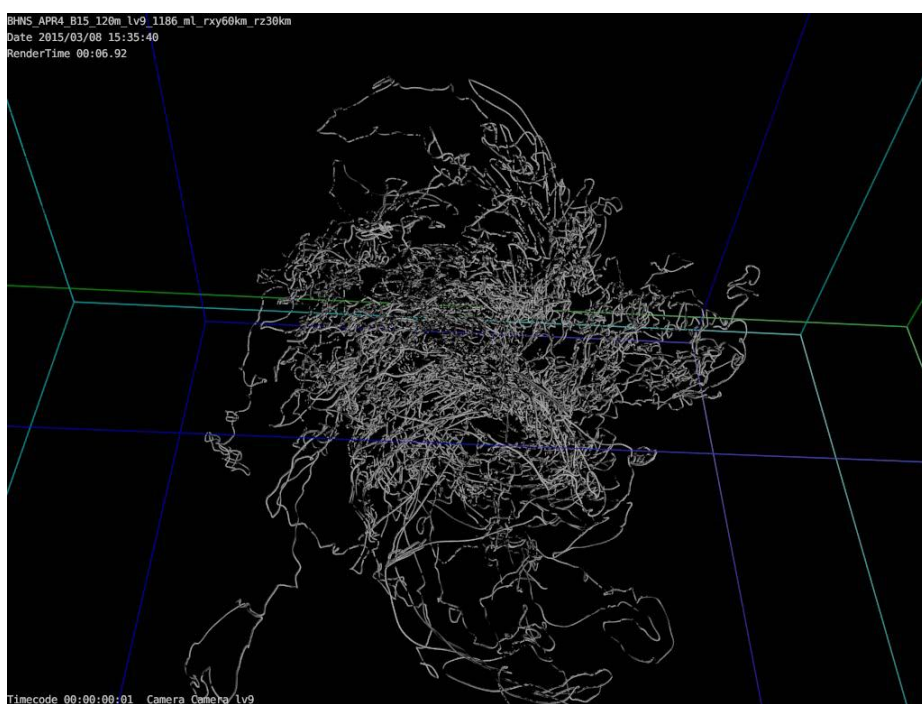
重力的束縛を逃れた流体要素の密度場



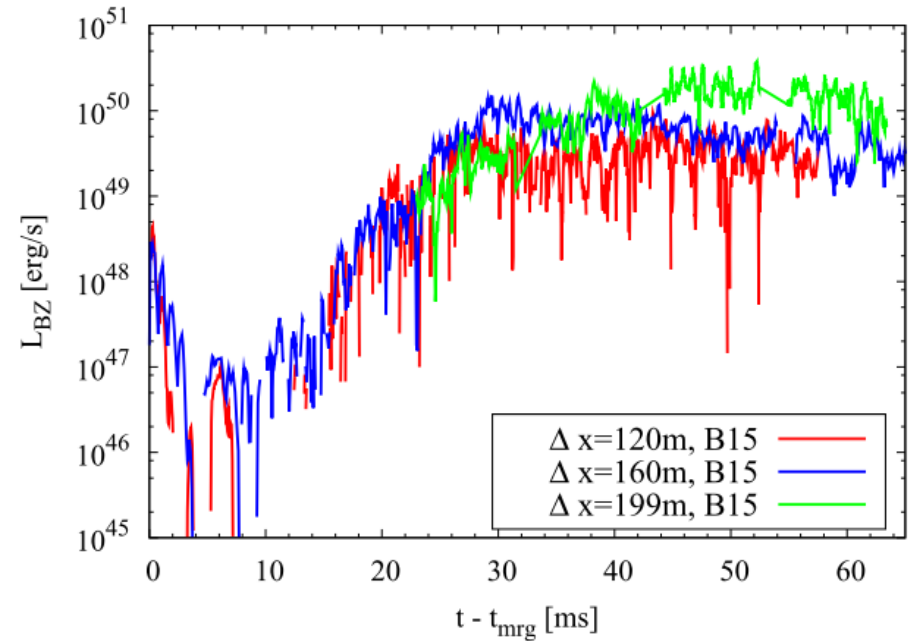
- ▶ 降着円盤内で**磁気回転不安定性**により乱流が発達
- ▶ **磁気乱流粘性**による質量降着の促進と熱エネルギーへの転換
- ▶ 熱圧力によって円盤風が駆動
- ▶ 高解像度シミュレーションで初めて解き明かされた描像

円盤風の応用

磁力線



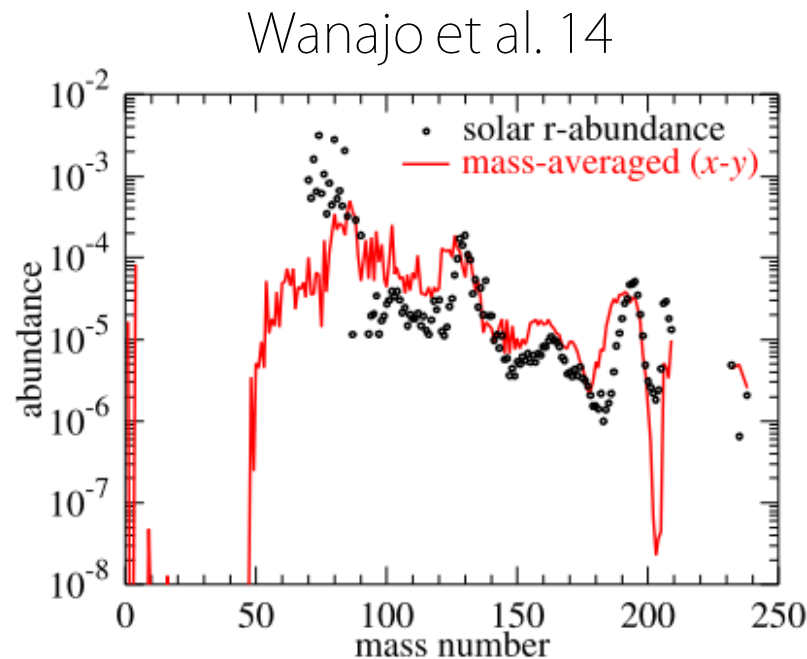
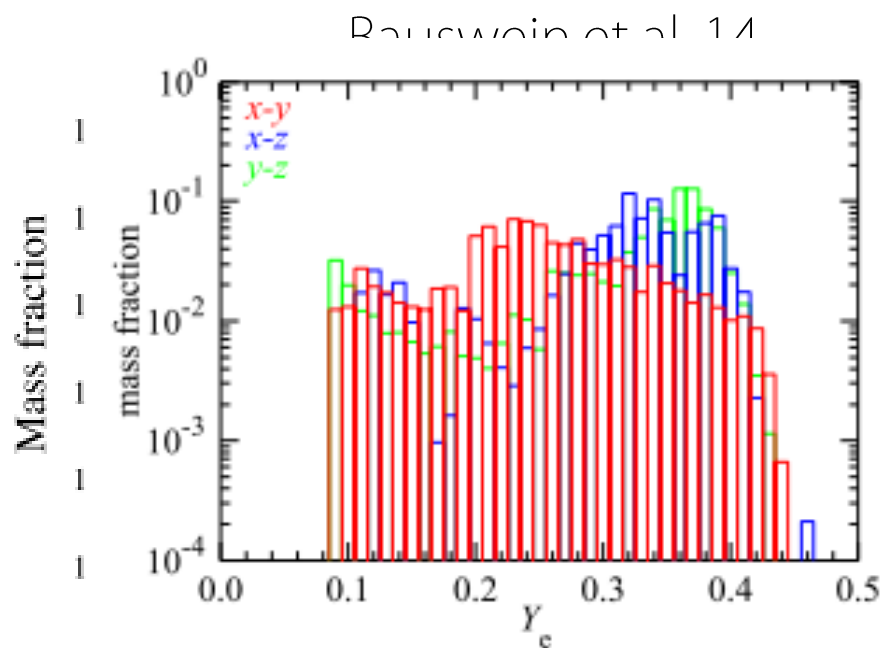
Blandford-Znajek光度の時間発展



- ▶ 円盤風によってブラックホール磁気圏が形成
 - ▶ ブラックホール回転エネルギーの引き抜きが効率化；光度 $\approx 2 \times 10^{49}$ erg/s (Blandford-Znajek 77)
- ⇒ガンマ線バーストの中心エンジン候補

ブラックホール-中性子星合体におけるR過程元素合成

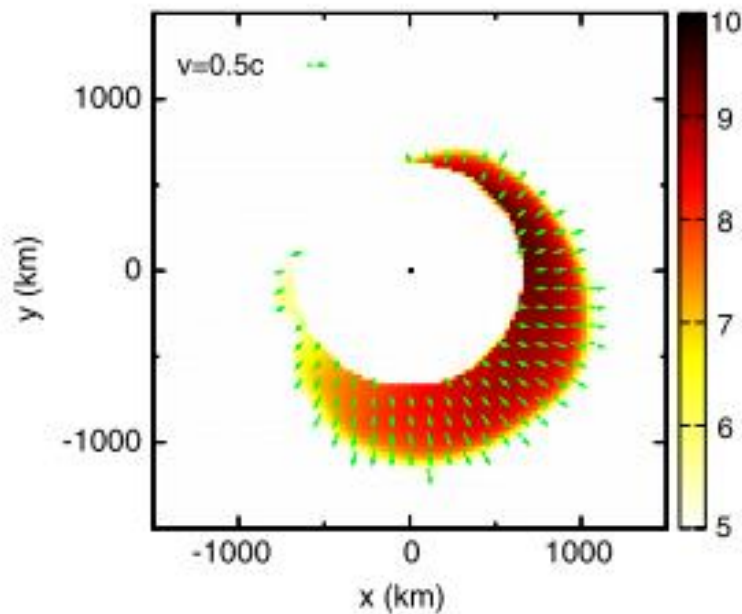
- ▶ 潮汐成分は低い電子存在比; $Y_e \lesssim 0.1 \Rightarrow$ 太陽系組成を再現できず



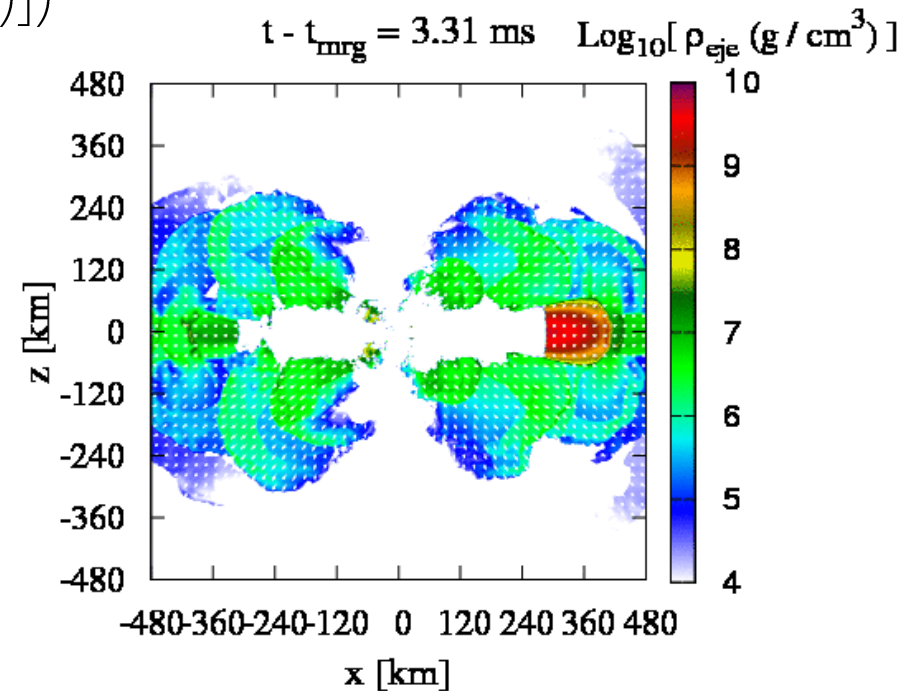
- ▶ 降着円盤風は高温 \Rightarrow ニュートリノ反応によって電子存在比は高くなる
- ▶ 潮汐成分と降着円盤風成分の合成 \Rightarrow 太陽系組成を再現できる可能性 (BH-NS: Just et al. 15, NS-NS: Sekiguchi et al. 15, 16, Wanajo et al. 14)

R過程元素の放射性崩壊による電磁波放射

軌道面における放出物質の密度場
(潮汐破壊成分) ($\text{Log}[\rho(\text{g/cc})]$)



降着円盤からの風

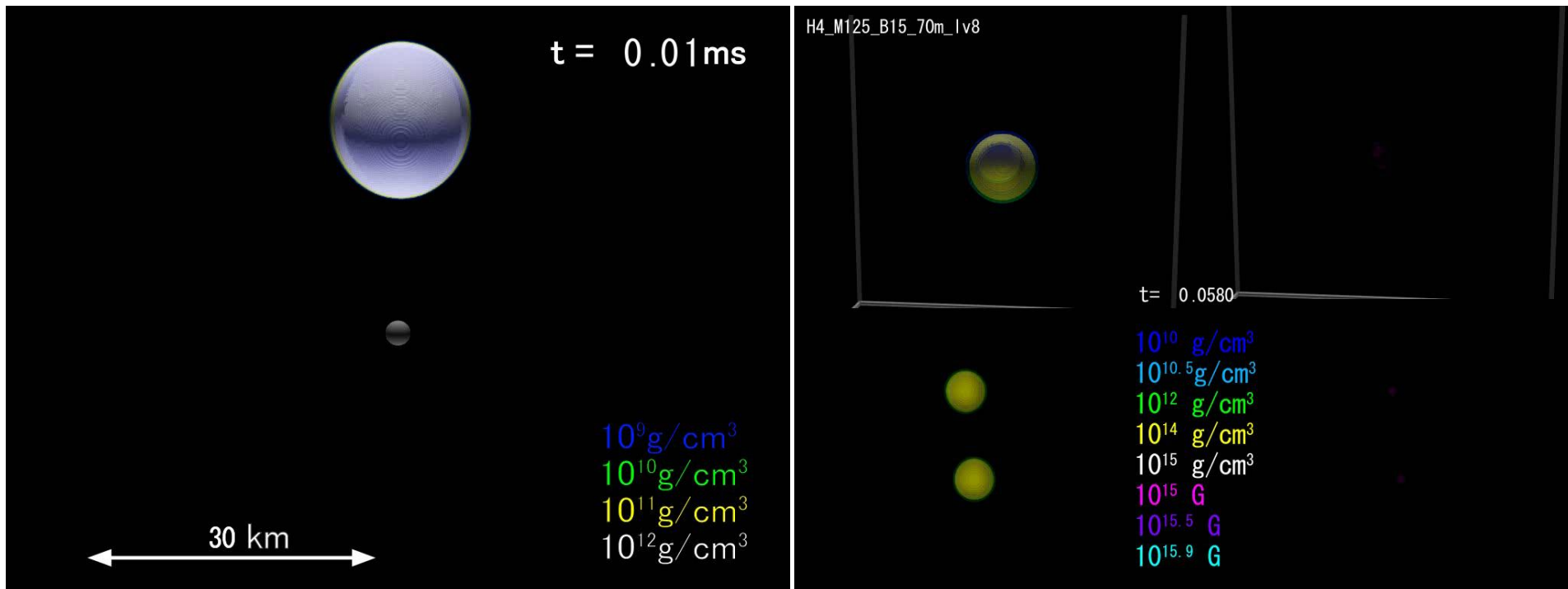


► 放出質量；降着円盤成分>潮汐成分⇒電磁波対応天体のモデル化をより精緻にする必要あり

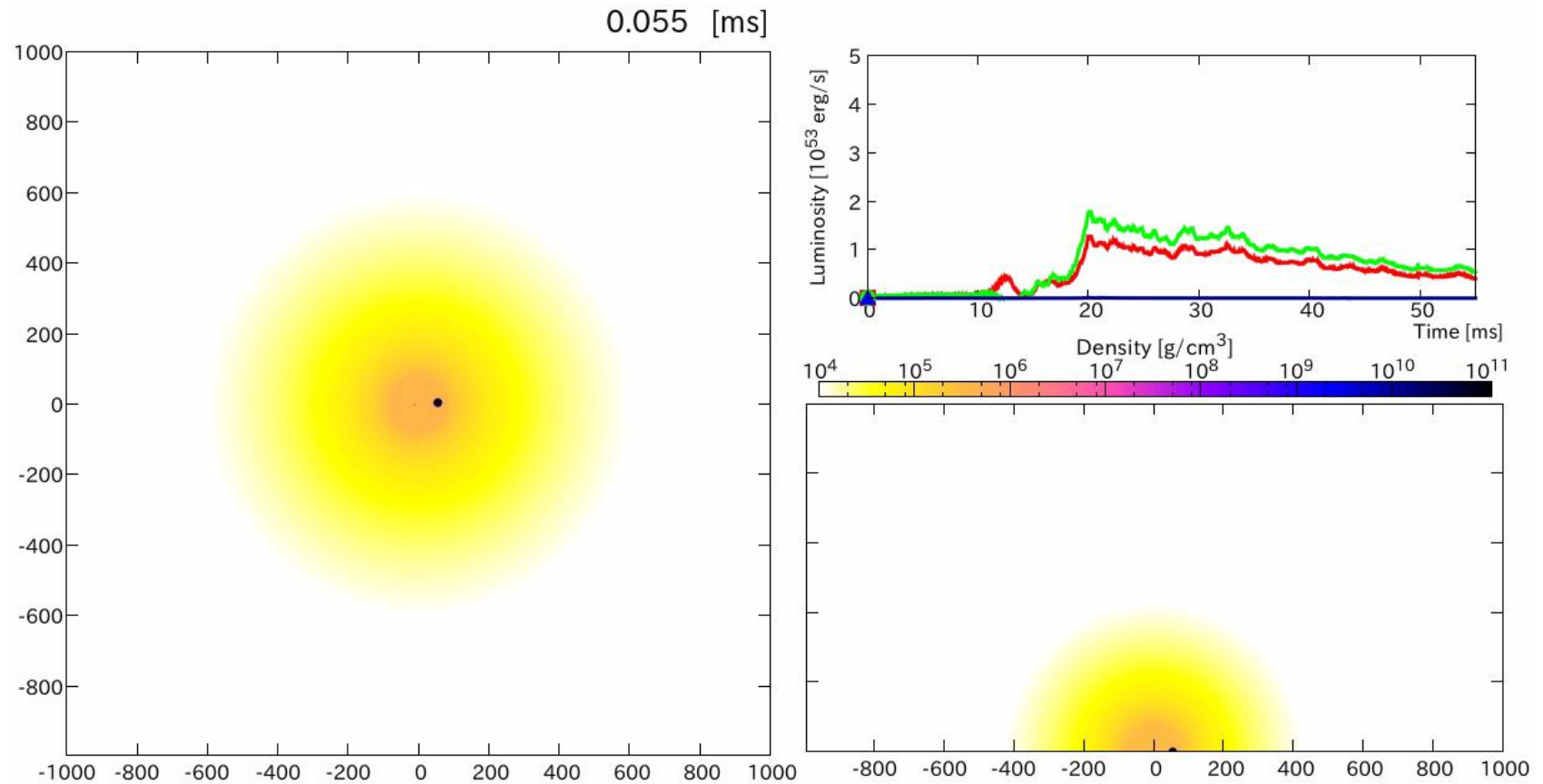
さらに

▶傾斜したスピンを持つブラックホールと中性子星連星合体の磁気流体シミュレーション（ニュートリノの効果はなし）(Kiuchi et al. 16 in prep.)

▶低質量連星中性子星合体（ $1.25-1.25M_{\odot}$ ）の最終状態（ニュートリノの効果はなし）(Kiuchi et al. 16 in prep.) \Rightarrow 磁気流体不安定性起源の粘性の評価



ブラックホール-中性子星合体の輻射流体シミュレーション (磁場の効果はなし) (Sekiguchi KK et al. 16 in prep.)



- ▶ 高いニュートリノ光度
- ▶ ニュートリノ風

将来展望

▶ ポスト京へ向けたニュートリノ輻射磁気流体—数値相対論コードの開発⇒ガンマ線バーストの中心エンジン、R過程元素合成、重力波への応用（ポスト京コデザインのサブワーキンググループメンバー）⇒重力波／電磁波観測の研究者との連携

▶ 連星中性子星／ブラックホール—中性子星合体からの重力波のより精緻な波形テンプレートの準備と公開⇒重力波データ解析への応用（状態方程式の情報を抽出）

理論／多角的な観測を用いてコンパクト連星合体過程の現実的描像を解明する研究を推進する

まとめ

▶連星中性子星、ブラックホール中性子星連星合体の現実的な描像の解明を目指し、磁場、ニュートリノが果たす役割を「京」プロジェクトで精査した。

▶ケルビン-ヘルムホルツ不安定性／磁気回転不安定性起源の乱流粘性を再現することが重要 ⇒ 降着円盤風や大質量中性子星からの質量放出

▶ニュートリノ冷却／加熱は放出物質の化学組成を決めるのに重要 ⇒ R過程元素合成に本質的

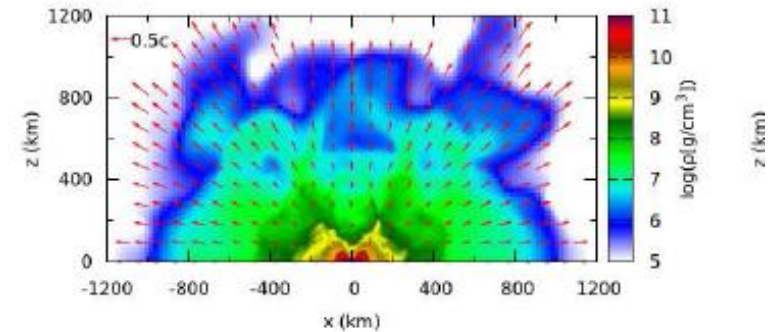
ブラックホール-降着円盤や大質量中性子星からの中性子過剰物質放出の包括的な描像を得るために本質的

GRB130603Bの電磁波対応天体モデリング

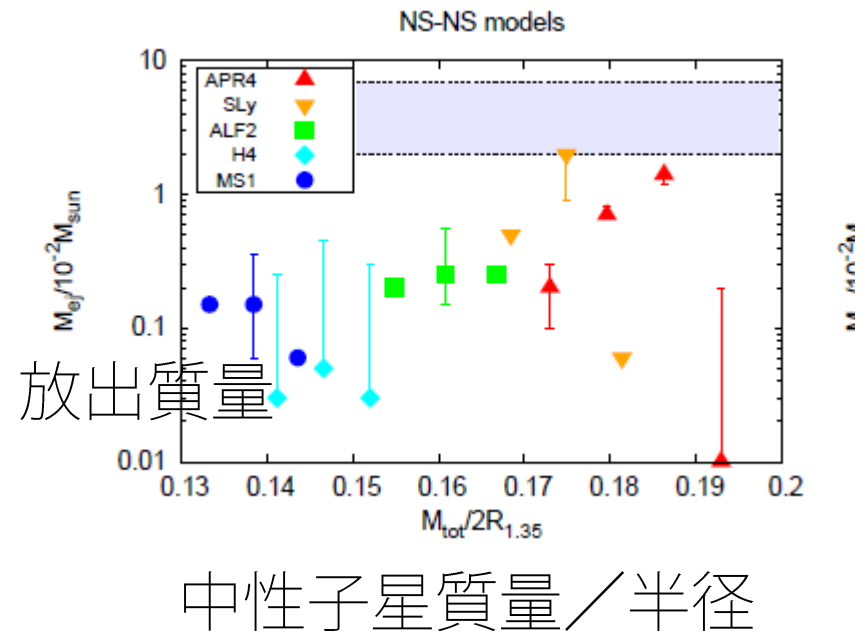
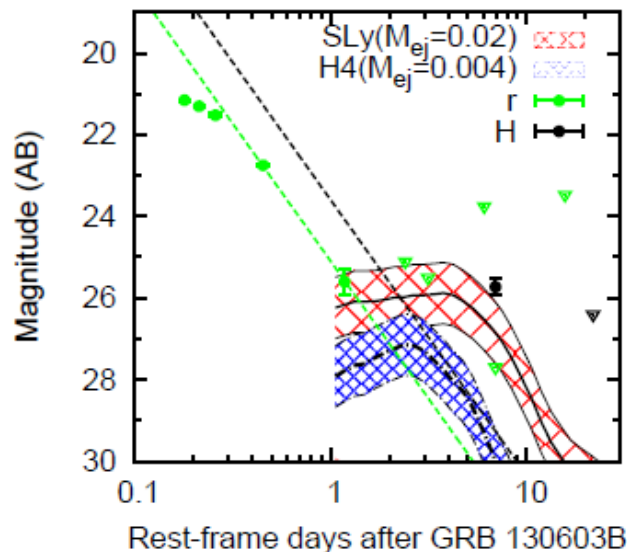
(国立天文台田中雅臣助教との共同研究, Hotokezaka, KK. et al.13b)

1st step: シミュレーション⇒連星中性子星合体からの動的放出
放出物質の形態

$$10^{-4} \lesssim M_{\text{ej}}/M_{\odot} \lesssim 2 \times 10^{-2} \quad (\text{soft EOSs}),$$
$$10^{-4} \lesssim M_{\text{ej}}/M_{\odot} \lesssim 5 \times 10^{-3} \quad (\text{stiff EOSs}).$$

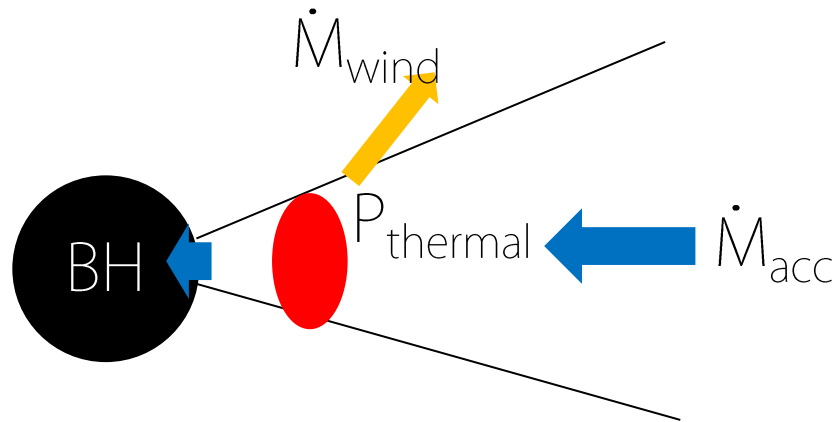


2nd step: フォトンの輻射輸送シミュレーション (熱源: R過程
元素の崩壊熱) ⇒ 光度曲線



磁気乱流粘性駆動の降着円盤風

▶磁気回転不安定性による乱流粘性が質量降着を促進し、熱圧力へ変換する



低解像度では乱流粘性が再現されず

