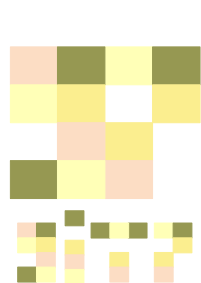


磁場連星中性子星合体の数値相対論シミュレーション

戦略プログラム 5 課題 3 : 超新星爆発およびブラックホール誕生過程の解明

木内建太(YITP)、久徳浩太郎(UWM)、関口雄一郎(YITP)、柴田大(YITP)

- 動機
- コードチューニング状況
- 計算進捗状況
- まとめ



YUKAWA INSTITUTE FOR
THEORETICAL PHYSICS



動機

連星中性子星合体

▶ **重力波**の重要なターゲット(2015年頃観測開始)

▶ 理論波形の予測 (高精度波形)

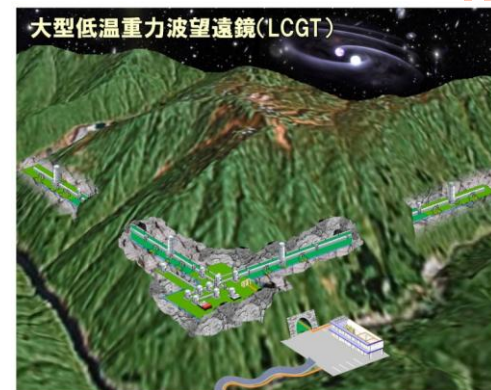
▶ ショート**ガンマ線**バースト中心動力源？

▶ 電磁波対応天体 (**電波**／**可視赤外**)

合体過程で放出された物質 (潮汐力、ニュートリノ風、磁気風)

→ 星間物質と相互作用 (Nakar & Piran 11)

• r過程で生成された元素の放射性崩壊(macro nova)
(Li-Paczynski 98, Metzger+10, 12)



元素合成の有力な生成現場

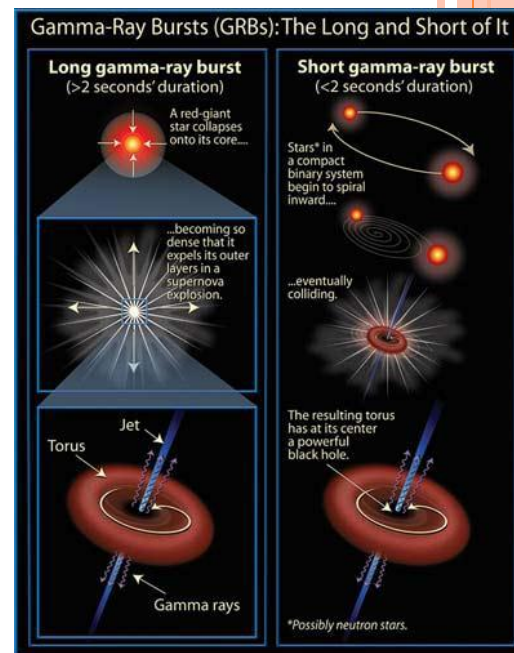
通説：超新星爆発は重元素の有力な生成現場

超新星爆発のメカニズムはニュートリノが有力

→ 原始中性子星から吹くニュートリノ風はproton rich

→ **r過程**による**重元素合成は厳しい**

→ **連星中性子星合体が元素合成の有力なサイト**



動機

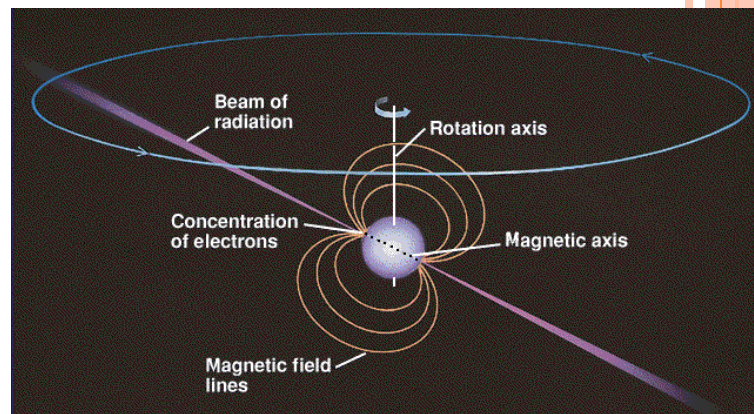
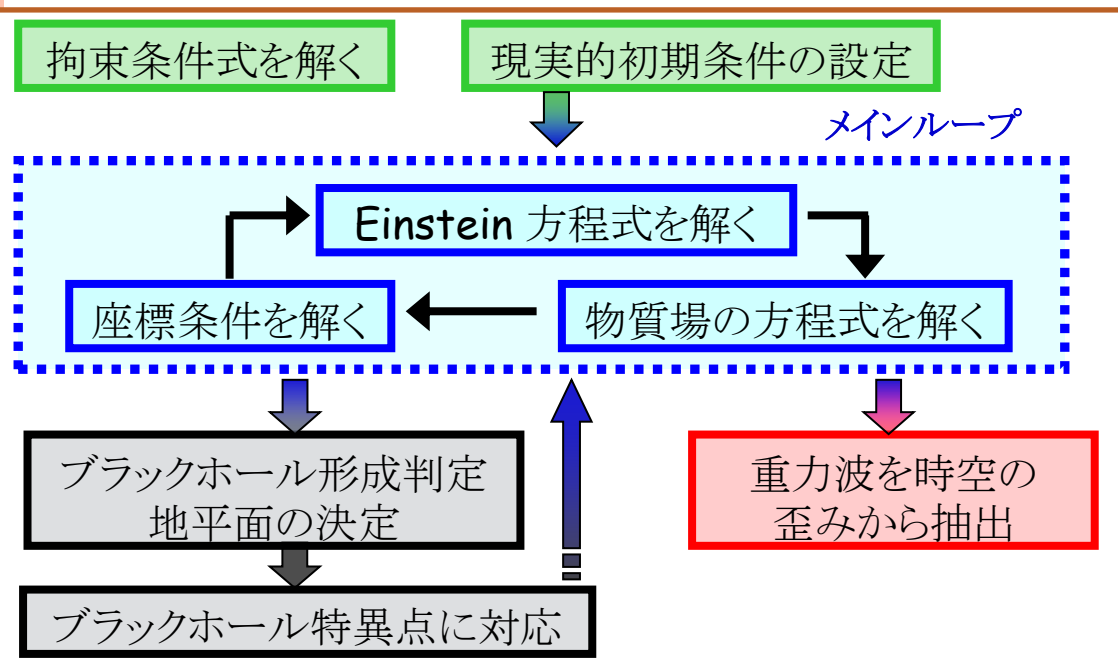
数値相対論が果たす役割

- ▶ 高精度重力波形
- ▶ 放出物質のモデル化（質量、速度、化学組成等）
→ 元素合成 / 電磁波対応天体
- ▶ 放出電磁波の予測

連星中性子星合体における磁場の効果を精査する

数値相対論のフローチャート

パルサー = 磁場中性子星



$B_{\max} \sim 10^{11-13}$ ガウス
cf. マグネター 10^{14-15} ガウス

動機

なぜ大規模数値計算が必要か？

磁場中性子星連星合体における磁場増幅機構

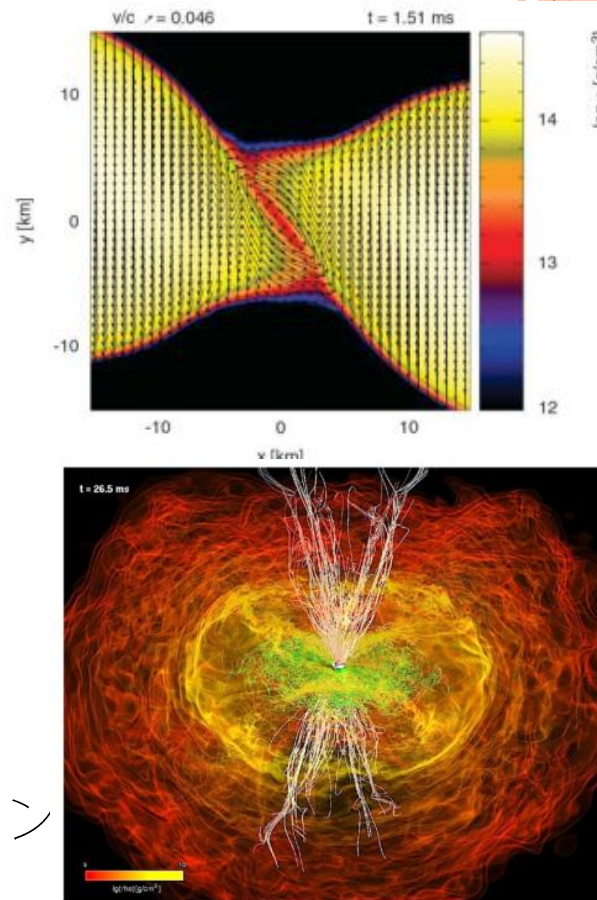
- ▶ 星の接触面での **ケルビン-ヘルムホルツ不安定性** (Price-Rosswog 06, Gaicomazzo+ 11)
- ▶ **磁気回転不安定性** (Balbus-Hawley 98, Rezzolla+ 11)
不安定性条件 $\nabla \Omega < 0$ 、不安定モード波長 $\lambda_A \propto B$
- ▶ 圧縮
- ▶ 巻き込み

どちらも短波長モードが本質的

現在、連星中性子星合体の数値相対論シミュレーションでは、解像度200mがせいぜい

→ 解像度100m (+長時間) シミュレーションが必要
(cf. 解像度倍→16倍の計算資源が必要)

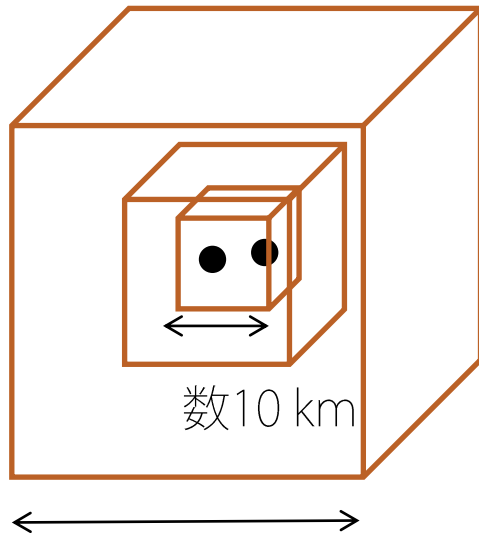
今後、数年に渡るマイルストーンとなりえる磁気流体シミュレーションを京で実行予定



コードチューニング状況

チューニングポイント (青：単体ノード、オレンジ：ノード間通信)

- ▶ アインシュタイン方程式 (2 1 成分の双曲型偏微分方程式)
- ▶ 磁気流体方程式 (8 成分の双曲型偏微分方程式)
- ▶ 保存量 (cf.モーメント) ⇒基本量(cf.速度) (ローレンツ因子を求めるroot finding)
- ▶ 多層格子法 (中性子星/BH~数キロ~数10キロから重力波波長~数100キロ)



チューニング法

- ▶ アインシュタイン方程式~100変数 (含む作業変数) B/Fの大きな計算
→メインメモリアクセスが計算を律速
- ▶ 磁気流体/保存量⇒基本量~20変数→演算が計算を律速
- ▶ 多層格子法~複雑なノード間通信→ノード数を増やすと通信にかかる時間↗

数1000 km ≧ 重力波波長

*全て差分法



コードチューニング状況

▶アインシュタイン方程式

- 動的メモリ割り付けの廃止⇒先頭アドレス計算の高速化
- 変数の統一化、ループの適当な分割⇒ラインアクセスの促進

チューニング結果

- 実効性能値：19.38%
- メモリースループット：38-39 Gbyte/s、cf. 理論値(実測値)：64(46)Gbyte/s

▶磁気流体／保存量→基本量

チューニング結果

- 実効性能値：21.1% / 16.4%
- SIMD演算命令率：96.4% / 99.7%

▶多層格子法

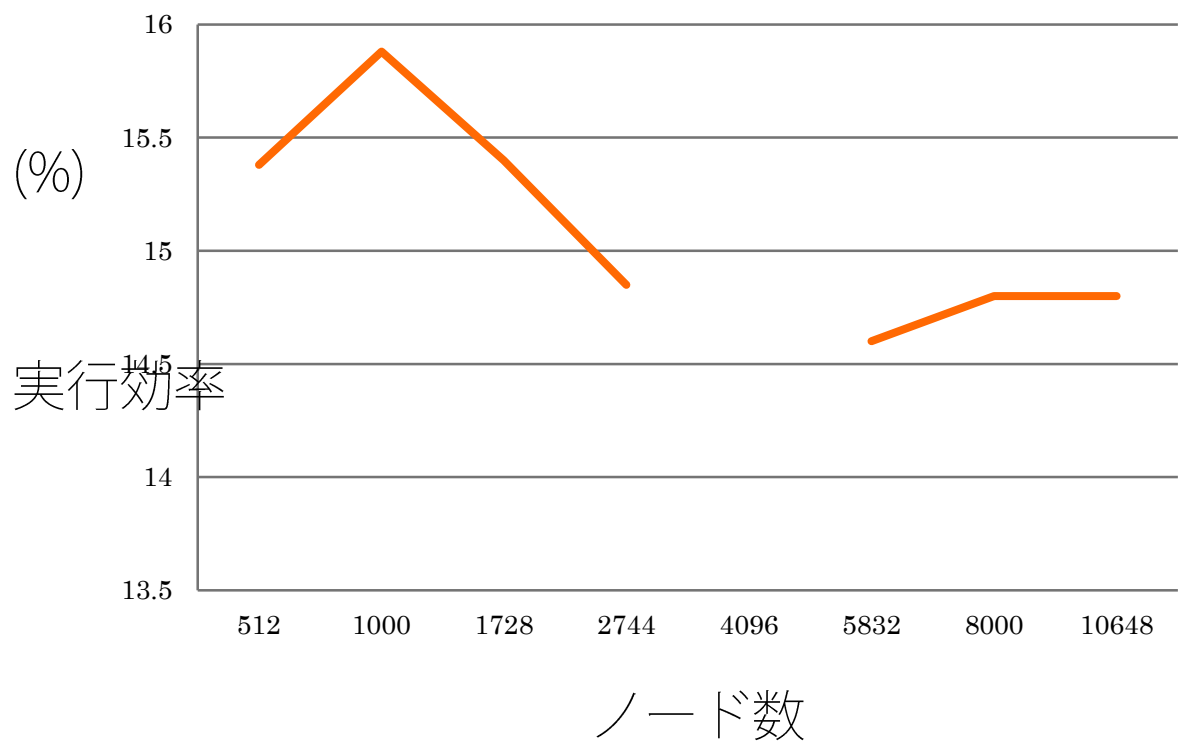
- 各方向のグリッド数／ノード及びノード数＝偶数→ノード間通信を明示化
(通信ルーチンの自動生成)
- ノードの物理アドレス／トーラスアドレスの最適化
(FJMPI_TOPOLOGY_RANKXYZ)

チューニング結果

- 512ノード→1,0648ノードに対して通信時間は約10%の増分



コードチューニング状況



- ▶ 10,648ノードまでweak scaling ~ 並列化効率 : 0.97
- ▶ 10,648ノード使用時、実効性能14.8 %
- ▶ 4,096ノードは計測できなかつただけ

チューニングはOK→プロダクティブランへ



計算進捗状況

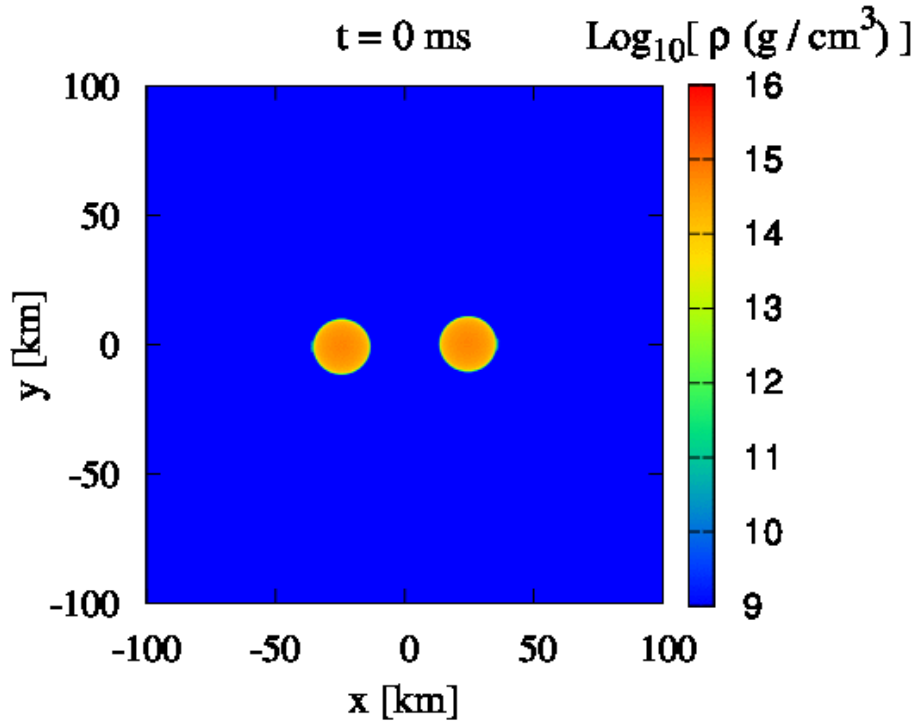
設定

- ▶ $\Delta x = 110\text{m}$ 、 $N_x \times N_y \times N_z \times (\text{格子レベル}) = (640)^3 \times 7$ ($70^3\text{km} \sim 4500^3\text{km}$)
- ▶ $1.35 M_{\odot} - 1.35 M_{\odot}$
- ▶ 相対論的平均場近似に基づいた状態方程式 (Gledenning & Moszkowski 91)
- ▶ 最大磁場強度： $10^{14.5}\text{G}$ (不安定性を分解できる設定)
- ▶ 10^3 ノード
- ▶ 所要計算時間：40万ノード時間の見込み(今年度割り当て時間分)

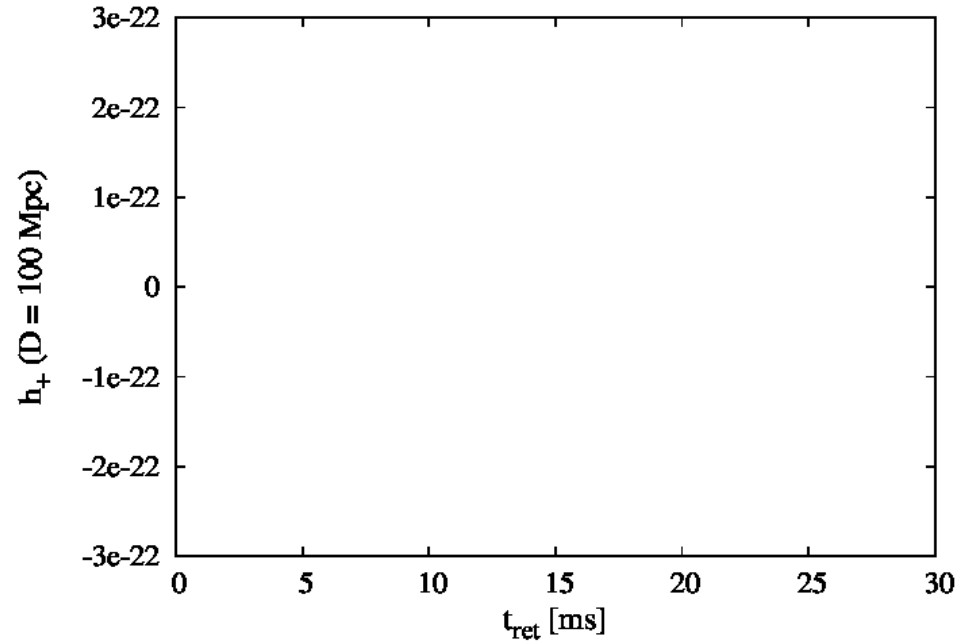


計算進捗状況

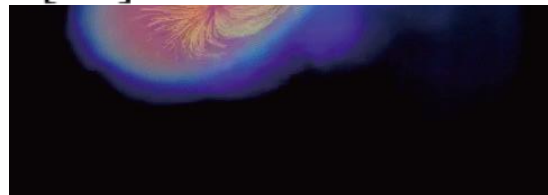
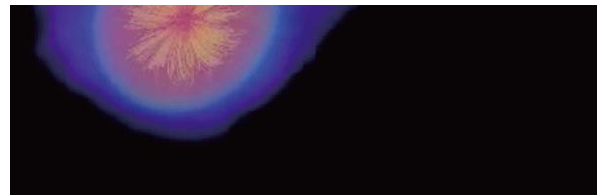
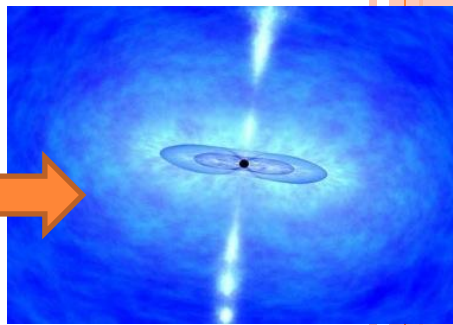
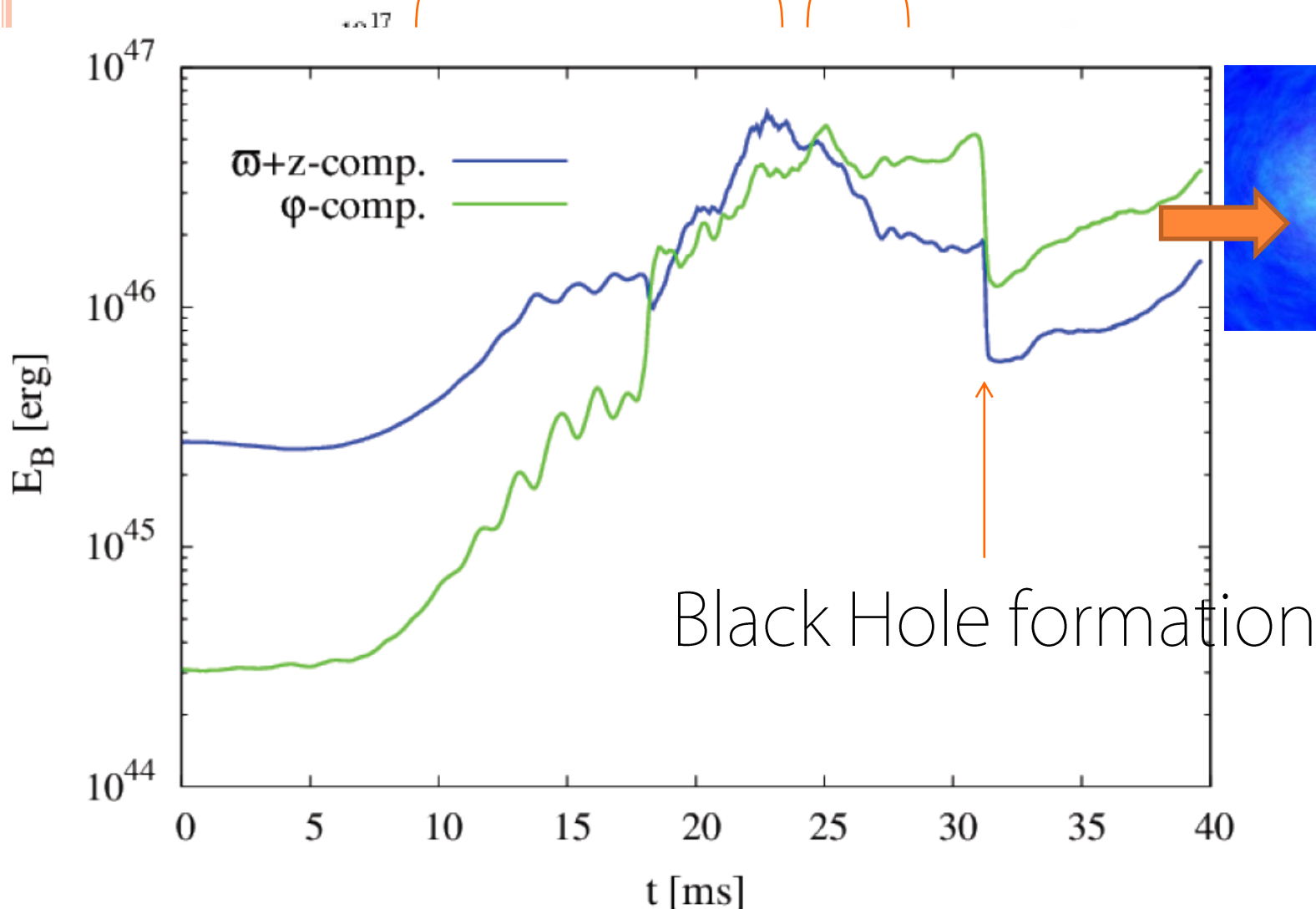
密度 (軌道面)



重力波波形



磁場時間進化 インスパイラル Kelvin-Helmholtz@ merger



来年度以降の予定

- ▶収束性のチェック (今年度と同じモデル)
- $\Delta x=80\text{m}$ 、 $N_x \times N_y \times N_z \times (\text{格子レベル})=1056^3 \times 7$ ($85^3\text{km} \sim 5440^3\text{km}$)
- 時間ステップ100万ステップ ($\sim 100\text{ms}$)
- 4,096ノード \rightarrow 約200万ノード時間積

収束性チェックの後、

- ▶連星モデル($1.35 M_{\odot} - 1.35 M_{\odot} / 1.4 M_{\odot} - 1.4 M_{\odot}$)
- ▶最大磁場 ($B_{\text{max}} \approx 10^{14.5} / 10^{15}$ ガウス)
- ▶状態方程式 (Akmal-Pandharipande-Ravenhall

あるいは類似のSly)

に対して、系統的サーチを実行



まとめ

- ▶ 磁場連星中性子星合体→マルチメッセンジャー天文学／元素合成／ガンマ線バーストから注目
- ▶ 数値相対論的シミュレーションコードの整備
- ▶ 計算は順調に進行（京特有の問題以外は）

来年度実行予定のシミュレーション⇒科学的成果

謝辞：似鳥 啓吾氏（理化学研究所）、石山智明氏（筑波大学計算科学研究センター）

