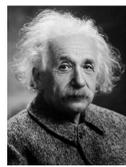
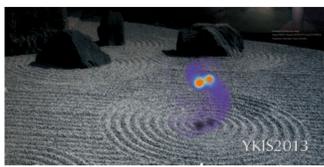


研究概要

重力波と連星中性子星合体

重力波は、一般相対性理論の帰結として得られる時空のさざなみ



非常に微弱な信号： $h_c \sim 10^{-22} \sim$ 水素原子/地球と太陽の距離

Q.観測は出来るのか？

A.実現間近。Advanced LIGO（米）は昨年観測開始、KAGRA（日）は2018年頃に観測開始

Q.どんな天体から重力波が伝搬するのか？

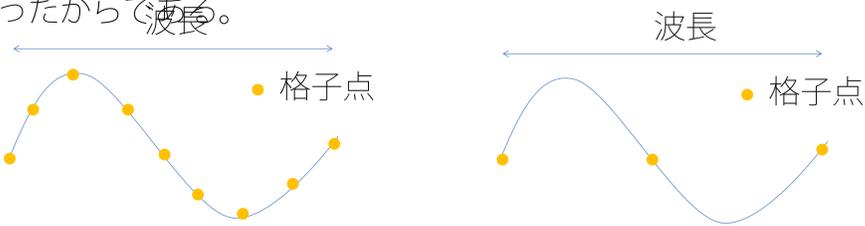
A.中性子星やブラックホールからなる二重連星の合体。中性子星は、太陽程度の質量で半径が10km程度しかない宇宙に実在する極限天体である。中性子星-中性子星連星は、現在までに6個観測されている。ハルスとテイラーによるPSR B1913+16の軌道周期の減衰の発見⇒重力波の間接的存在証明（1993年ノーベル物理学賞）

Q.重力波が観測されると人類は何を知り得るのか？

A.①一般相対性理論の強い重力場中における正しさ。②中性子星の内部状態（真の核密度状態方程式）。③鉄より重い元素（金やウランなど）の起源。④ショートガンマ線バーストという爆発的天体現象の解明。

「京」で得られた成果

連星合体における中性子星磁場の増幅を解明した。中性子星は宇宙最大の磁石である。 $10^{11} \sim 10^{15}$ Gauss（太陽の黒点は数1,000 Gauss）。しかし、合体過程における磁場増幅は良く理解されていなかった。磁場増幅過程を正しく追跡するには、超高解像度の計算が必要不可欠だったからである。



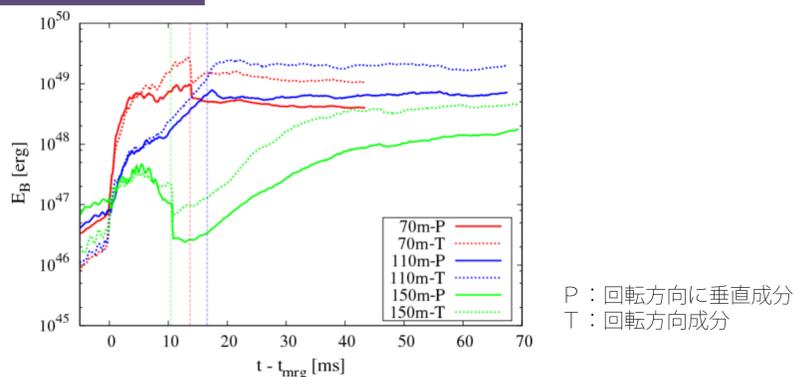
磁場増幅機構である不安定モードの波長と格子点の概略図。格子点が不足していて、波が正しく解像できなかったのが「京」以前（右）。十分な数の格子点で波を解像した「京」の結果（左）。

「京」以前と「京」の解像度と格子点数の比較

	解像度	格子点総数 (Nx×Ny×Nz)
「京」以前	180m	240×240×120
「京」	70m	1,024×1,024×512

計算規模にして約70倍。「京」にのみ実行可能な課題

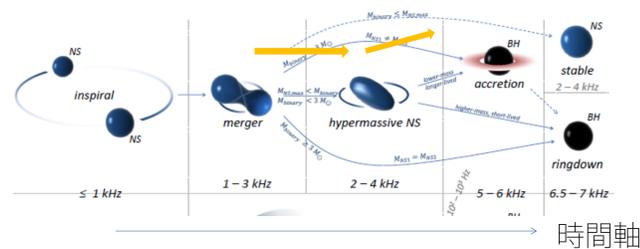
データ解析



磁場エネルギーの時間発展。時間0が合体時刻。縦の点線はブラックホール形成時刻。赤線は「京」の結果、緑線は「京」以前の結果。

- 合体時（時間0）の磁場増幅は「京」以前の結果に比べて顕著。約100倍増加。増幅機構はケルビン-ヘルムホルツ不安定性の短波長モード。「京」以前では正しく解像できていなかった。
- 過渡的に形成される重い中性子星内部でも磁場は増幅（時間0～10-15ミリ秒）。増幅機構は磁気回転性不安定性の最大成長モード。やはり「京」以前では正しく解像できず。
- ブラックホール崩壊後の降着円盤中では磁場は増幅せず（時間10-15ミリ秒以降）。「京」以前では顕著に増幅。定性的に誤った結果。

連星中性子星合体



進化の過程は連星質量と中性子星の最大質量で決まる。連星質量の観測値は2.6～2.8太陽質量、中性子星の最大質量は2太陽質量以上。合体後に高速回転中性子星が過渡的に形成され、ブラックホールへ重力崩壊するのが進化のおおまかな道筋。

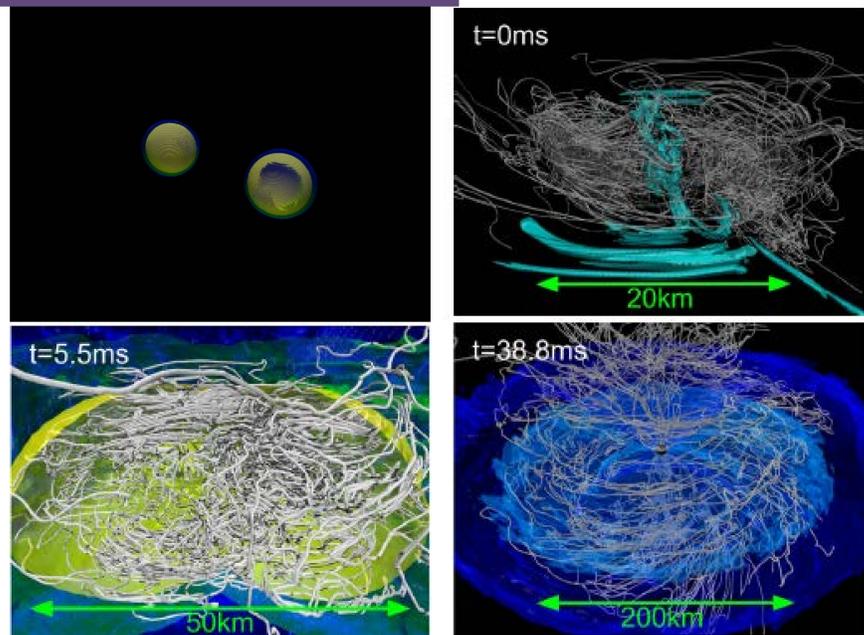
合体過程の現実的な描像を確立することが急務！

数値相対論と呼ばれる理論的な枠組みで、京を用いた大規模数値シミュレーションを実行することで、合体の詳細な過程の解明する。

数値相対論とは、アインシュタイン方程式、磁気流体力学方程式、ニュートリノ輻射場を連立させてスーパーコンピュータ上で解くことである。

ブラックホール形成の第一原理計算＝ブラックホールを“創る”

シミュレーションの可視化



左上：合体前の密度場の等値面。右上：合体の磁力線（白）と磁場強度（水色）。左下：合体後の高速回転中性子星の密度場の等値面（黄、青）と磁力線（白）。右下：ブラックホール崩壊後の密度場の等値面（青、薄青）と磁力線（白）。

まとめ

- 重力波源の有望な候補である連星中性子星合体の現実的な描像により迫った。合体時における磁場増幅は不可避免的に起き、合体後には強磁場中性子星が必ず形成される。これは、磁場を限定的に扱ってきた既存のモデリングからのパラダイムシフトである。
- 先行研究は定性的に誤った描像を導き出していた可能性を指摘した。
- 数値相対論シミュレーションとしてはこれまでにない規模で行ったシミュレーションであり、今後数年間に渡り、当該分野におけるマイルストーンと位置付けられる研究である。

今後の進展

- ニュートリノ輻射場と磁気流体効果を結合させ、連星合体過程のより現実的な描像を解明する方向へ進むと予想される（ニュートリノ輻射場の効果のみを解明した研究も本課題の一部として遂行。PIは関口雄一郎）。
- 重力波直接観測のニュースが近い将来届くと予想されるため、重力波天文学の開闢と共に、世界的競争はさらに熾烈になると予想される。
- 研究者のみで構成される現状の研究体制は限界がある。最適化や可視化についての専門家を含めたグループで研究体制を構築すべき（ポスト京の課題）。