

2014年9月1日
国立大学法人京都大学

連星中性子星の合体とブラックホールの進化過程に新解釈 —スーパーコンピュータ「京」で磁場の増幅機構が明らかに

概要

京都大学基礎物理学研究所の木内建太特任助教らの研究グループは、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」^{*1}を用いて、連星中性子星の合体およびその後の進化過程の新たな描像を示すことに成功しました。

2つの中性子星^{*2}からなる連星中性子星は重力波の発生により合体し、ガンマ線バーストと呼ばれる爆発現象を起こす可能性があります。また、重元素合成を引き起こしている天体の候補でもあります。そのため連星中性子星合体の解明が求められており、理論、観測に加えて数値シミュレーションからのアプローチが進んでいます。

研究グループは中性子星がもつ磁場に注目し、合体とその後の進化にどのように影響を及ぼすかを探りました。その結果、従来は合体後形成されるブラックホール周辺の降着円盤内で磁場が増幅されるとされていましたが、2つの磁気流体不安定性によりブラックホールの形成前に磁場が増幅されることがわかりました。

本研究は、文部科学省 HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」および計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) の元で実施したものです (課題番号: hp130025, hp140211)。この研究成果は、国際論文誌「Physical Review D」(2014年8月28日号)に掲載されました。

1. 背景

2つの中性子星からなる連星中性子星は、重力波の発生により合体し、さまざまな天体現象を引き起こすとされます。重力波を発生させ、ガンマ線バーストと呼ばれる宇宙最大規模の爆発現象を起こし、鉄より重い重元素の合成現場の候補としても注目されています。

連星中性子星合体からの重力波を直接観測できた場合、強い重力場における一般相対性理論の検証が可能になります。従って、連星中性子星合体は、次世代の重力波望遠鏡の有望な観測ターゲットとなっています。現在、建設中である日本の KAGRA、米国の advanced LIGO、イタリア・フランスの advanced VIRGO は 2018 年頃から本格稼働を開始する予定です。連星中性子星の合体イベントをそれぞれ年間 10 回程度観測できると見積もられています。他にも、重力波には中性子星の半径の情報が含まれるため、中性子星の内部構造に関する知見が得られます。

また、連星中性子星合体は、ガンマ線バーストと呼ばれる宇宙最大規模の爆発現象を駆動する可能性が示唆されています。仮にガンマ線バーストと重力波が同時に観測された場合、

未解明な部分が多いガンマ線バーストの謎に迫れると期待されています。

太陽系に存在する重元素の起源は、超新星爆発説が有力でした。ところが最近、40年ほど前に提案された連星合体説が改めて注目されるようになり、精力的な研究が行われています。

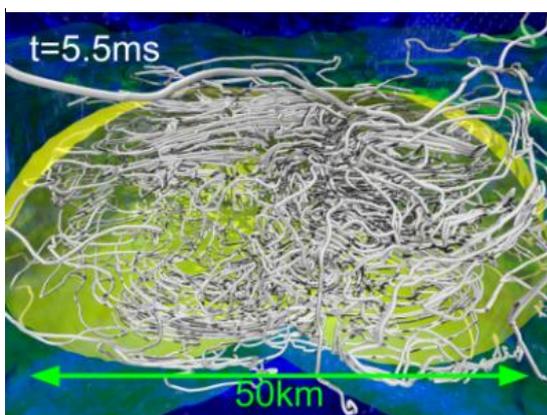
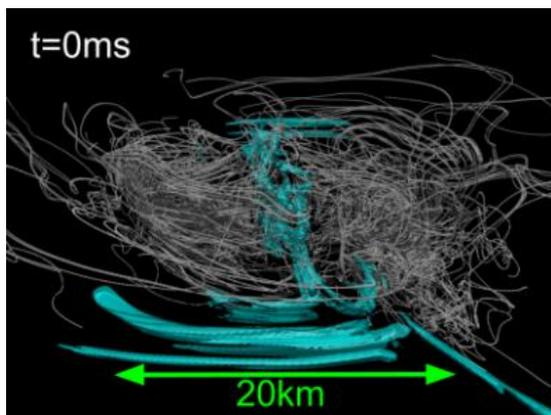
以上から、連星中性子星合体の解明が強く期待されており、理論、観測に加え、今回の研究のような数値シミュレーションからのアプローチが進んでいます。

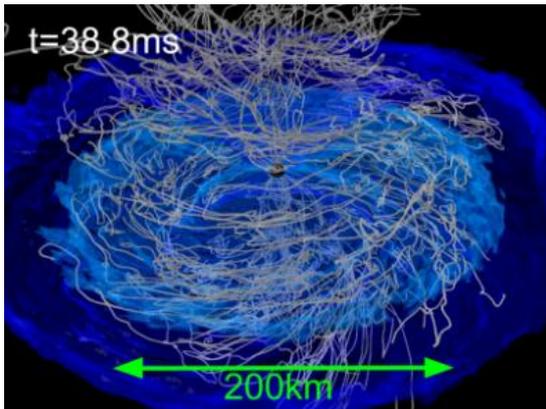
2. 研究手法と結果

理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を用いて、連星中性子星合体の数値的相対論-磁気流体シミュレーションを世界最高の空間解像度で行いました。その結果、連星中性子星合体過程における磁場増幅機構を解明し、合体後の進化過程を新たに描き出すことに成功しました。

数値的相対論とは、強い重力場における高エネルギー天体现象をコンピュータ上で解き明かすことを目的とした研究分野です。一般相対性理論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式を、磁気流体や輻射流体と連立させて数値的に解きます。今回は磁気流体効果に焦点をあて、中性子星が元来保持する磁場が合体過程でどのように増幅し、合体とその後の進化にどのように影響を及ぼすかを探りました。

磁場増幅を引き起こす原因は磁気流体不安定性^{*3}にあります。波長が短いモードほど大きい成長率を持ち、効率的に磁場を増幅します。あるモードを数値的に解像するためには、1波長を10個程度のグリッド点で覆う必要があります。つまり短波長モードを数値的に切り分け、磁場増幅過程を正しく追跡するためには、高解像度の数値シミュレーションが欠かせないのです。本研究では、従来約3倍高い空間解像度のシミュレーションを「京」で実行し、中性子星連星の合体とその後の進化を解き明かしました。





図：磁力線（白色線）、磁場強度（左上図：水色）、密度等値面（右上図、左下図：黄色、濃い青、薄い青）

左上図は中性子星連星合体直後の磁力線（白色線）と磁場強度（水色）を表します。合体時には星の接触面（左上図中央付近）で「ケルビン - ヘルムホルツ不安定性」が発生し、渦が生成されます。磁場はこの渦に巻き込まれることによって増幅され、スケールの小さい渦ほど大きい成長率を持ちます。本研究では、この過程で磁場が有意に増幅されることを初めて示しました。

右上図は、連星の合体後に誕生した重い中性子星の密度等値面（黄色= 10^{15}g/cm^3 ）と磁力線（白色線）を表します。磁力線の様子から、磁場が乱流状態になっていることが見てとれますが、これは「磁気回転不安定性」により磁場が増幅された結果です。連星合体後、過渡的に存在する重い中性子星内部で磁気回転不安定性により磁場が増幅されることを、首尾一貫したシミュレーションの中で示しました。

左下図は重い中性子星がブラックホールに崩壊した後、周囲に形成される降着円盤の密度等値面（薄い青= $10^{10.5} \text{g/cm}^3$ 、濃い青= 10^{10}g/cm^3 ）と磁力線（白色線）の様子を表します。先行研究では降着円盤内で磁場が増幅されると指摘されていましたが、前述の 2 つの増幅機構（左上図と右上図）により磁場が十分に増幅されるため、円盤内では磁場増幅が起こらないことが判明しました。

この研究の中で、木内特任助教は数値コードの作成、数値計算の実行、データ解析、論文執筆を、共同研究者である京都大学基礎物理学研究所の柴田大教授、関口雄一郎特任助教は解析結果の議論、論文執筆、ウィスコンシン大学ミルウォーキ校の久徳浩太郎研究員は数値計算の初期条件の計算、筑波技術大学（論文発表当時は国立天文台）の和田智秀研究員は数値計算データの可視化を行いました。

3. 今後の期待

本研究では、連星中性子星のいくつかあるモデルのうち限定的なものを扱いました。今後は他のモデルも検討し、より系統的な研究が期待されます。

また、本研究では合体過程で磁場が有意に増幅することが示されましたが、最終的にどの程度まで増幅されるかは今後の課題です。さらに、合体により形成されるブラックホール - 降着円盤がガンマ線バーストを駆動するのかどうかを突き詰める必要があります。

論文

K. Kiuchi, et al. “High resolution numerical-relativity simulations for the merger of binary magnetized neutron stars” *Physical Review D*, volume 90, 041502(R), (2014)

用語解説

※1 中性子星

中性子を主成分とする極めて高密度な天体。太陽のおよそ 10 倍以上の質量をもつ恒星が超新星爆発を起こした後、その中心核から作られる。

※2 スーパーコンピュータ「京」

文部科学省が推進する「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI) の構築」プログラムの中核システムとして、理研と富士通が共同で開発を行い、2012 年 9 月に共用を開始した計算速度 10 ペタフロップス級のスーパーコンピュータ。「京 (けい)」は理研の登録商標で、10 ペタ (10 の 16 乗) を表す万進法の単位であるとともに、この漢字の本義が大きな門を表すことを踏まえ、「計算科学の新たな門」という期待も込められている。

※3 磁気流体不安定性

磁気流体には様々な不安定性が存在する。ここでは 2 つの代表的な不安定性を説明する。ケルビン - ヘルムホルツ不安定性は、逆向きの速度場を持った流体の境界面で発生する不安定性で、その結果、渦が生成される。磁気回転不安定性は動径方向に回転角速度が減少する場合に起こる一般的な不安定性であり、磁場を効率的に増幅する。