

研究課題名 ニュートリノ冷却を考慮した連星中性子星合体シミュレーション

利用者氏名(所属機関) 木内建太(京都大学基礎物理学研究所)

利用カテゴリ XT4A・SX9A

本研究の目的は、連星中性子星合体とショートガンマ線バースト中心エンジンの関係を必要な物理を適宜取り入れつつ、理論的に解明することである。また重力波やニュートリノといった観測シグナルの解析も重点的に行い、連星合体イベントの観測可能性について議論を展開する。本年度、XT及びSXシステムを用いて、行なった研究は以下の3つに大別される。

(1) ブラックホールと降着円盤の三次元数値相対論シミュレーション

連星中性子星合体がショートガンマ線バーストを駆動するためには、合体後にブラックホールが形成され、その周囲に質量の重い降着円盤が形成されることが必要である。高温かつ重い降着円盤から磁場もしくはニュートリノにより相対論的なジェットが形成されるといふ仮説が提唱されているが、この仮説には降着円盤が十分長い時間安定に存在することが暗に仮定されている。一方、ブラックホール周りの降着円盤には、非軸対称モードであるPapaloizou-Pringle(PP)不安定性が発現することが古くより示唆されてきた。この不安定性は、広いクラスの円盤、つまり様々な円盤質量、角速度プロファイル、円盤の自己重力の値に対して、出現することが示唆されている。しかし、不安定性発現から非線形相及び最終状態まで無矛盾に追跡した研究は存在しなかった。そこで、我々は空間三次元の数値相対論的シミュレーションを行った。得られた結果を要約すると、様々な円盤質量や角速度プロファイルに対して、PP不安定性が出現することが確かめられた。また、 $m=1$ の非軸対称モードが最も不安定かつ非線形相での占有モードになることをつきとめた。物理的には、ブラックホールと降着円盤の共通重心がある空間固定点(計算上では座標原点)に留まろうとするためと解釈される。重要なのは最終状態の降着円盤の密度構造が、重力波を効率よく放出するのに有利な構造である点にある。この重力波は日本のLCGTを含めた次世代重力波干渉計で観測可能であることが分かった。すなわち、ショートガンマ線バーストの中心駆動源がブラックホールと降着円盤であるならば、PP不安定性が起こる可能性が高く、かつ重力波によってこの仮説が検証可能である。本研究の結果はPhysical Review Letterに掲載決定済みである(ただし、発行は2011年度)。

(2) ニュートリノ冷却を組み込んだ連星中性子星合体の三次元数値相対論シミュレーション

連星中性子星合体の過程では、密度は 10^{15} 乗グラム立法センチメートル、温度は 10^{11} 乗度に達するため、原子核理論に基づいた状態方程式及びニュートリノ冷却が重要である。そこで我々は、相対論的平均場近似に基づいたShen状態方程式、ニュートリノ漏

れ出し法に基づいたニュートリノ冷却を同時に取り込んだ、世界ではじめての数値相対論的シミュレーションを実行した。得られた結果を要約すると、Shen状態方程式の場合、先行研究によると連星の合計質量が2.7-2.8太陽質量(以下、臨海質量とよぶ)を超えると、合体後すぐにブラックホールに崩壊することが予想されていたが、この予想に反し、合計質量が3太陽質量のモデルでさえも合体後数十ミリ秒間、重力波とニュートリノを放出しながら進化することが判明した。これは先行研究では、ゼロ温度の仮定のもとに臨海質量を見積もっていたが、実際には数10MeVまで加熱されるため、有限温度の効果が臨海質量に寄与するためである。最新の観測によると中性子星の最大質量は 1.97 ± 0.04 太陽質量であるので、実際の連星合体でも、重く熱い中性子星が過渡的に形成される可能性が高い。この中性子星は長時間、重力波とニュートリノを放出し続けるため、仮にこのイベントが10Mpc内で起これば、両方の信号が観測可能であることが判明した。この結果を報告した論文はPhysical Review Letterに掲載決定している(ただし、発行は2011年度)。

(3) Fixed-Mesh-Refinement法を用いた三次元相対論的磁気流体コードの開発

中性子星は一般に 10^{11} – 10^{13} ガウスの磁場を有している。また近年の観測により 10^{15} ガウスといった超強磁場を有した得意なクラスの中性子星の存在も確立しつつある。しかしこれらの磁場起源は全くの謎であり、また連星中性子星合体時に磁場がどの程度影響を及ぼすのかも良く理解されていない。また、一般に磁気流体不安定性は非軸対称モードが本質的であるので、空間三次元シミュレーションが必須である。そこで、中性子星など物理的に重要な対象の周りには解像度の高い格子を張りつつ、物理的にはあまり重要でない空間は解像度の粗い格子を張ることで数値計算上の境界を十分遠方に持っていくことが可能であるFixed-Mesh-Refinement法を実装した相対論的磁気流体コードを開発した。MPIを用いた並列化も完了済みである。現在、テスト計算に基づいた論文を執筆中である。