

研究の背景、研究目的、学術的特徴

ブラックホール・中性子星連星の合体は今後、宇宙物理学において重要な役割を果たすようになる天体である。ブラックホールは一般相対論により予言される、質量が太陽の10倍程度ながら半径が30km程度と非常に小さい天体である（恒星の半径は100万km程度）。中性子星は質量が太陽の1.4倍程度であり、半径が10km程度と非常に小さく、また内部の物質は原子核密度以上の高密度であり、典型的な磁場強度は 10^{12} Gauss (10^8 Tesla) という際立った特徴がある。これらの天体がお互いの周りを回る連星は、重力波を放射して合体し、その際には以下に述べるように様々な魅力的な観測可能な信号を發する。同時に、特に磁場の役割について未解明の点も多く、大規模計算を通じた理論的解明が必要である。

- (1) 重力波の有望な観測対象である。特に最近、アメリカのLIGOチームによりブラックホール同士の連星からの重力波が初めて検出されたことが報告された(Abbott et al., 2016)。今後、さらに中性子星との連星からの重力波が観測されれば、中性子星の状態方程式、つまり高密度核物質の性質（粒子の種類や相互作用）を知ることができる(Kyutoku et al. 2010, 2011)。この点については一定の解決が見られているが、過去に計算されていない連星のパラメータ領域も多く、これだけでも調べる価値がある。
- (2) ショートガンマ線バースト(SGRB)の起源天体となりうる。SGRBは2秒以内に太陽が一生で放出するのと同程度のエネルギーを爆発的にガンマ線として解放する天体現象である。その機構は未知であり、現在の宇宙物理学の大問題の一つであるが、有望な機構の一つは中性子星がブラックホールに破壊されて残された物質＝降着円盤が自発的に磁場を増幅し、それを介してブラックホールからエネルギーを引き抜くというものである(Blandford-Znajek 1977)。磁気流体力学では短波長のモードが重要な働きをするため、この機構がどの程度働くかの解明には高解像度の数値計算のみが有効な手段である。
- (3) 中性子過剰な物質を放出し、r過程元素を合成しつつ赤外線での増光現象：キロノヴァを起こしうる。連星の合体に伴って中性子過剰な物質が放出されると、金やプラチナ、レアアースなどの中性子過剰な元素を合成するr過程元素合成が起こる可能性が高く(Lattimer-Schramm 1974)、最近ではr過程元素の最も有望な供給源として連星合体が注目を集めている。さらにr過程元素の一部が放射性崩壊を起こし物質全体が熱くなることで、キロノヴァと呼ばれる放射を起こす可能性があり(Li-Paczynski 1998)、これは重力波に付随して観測可能な電磁波放射として近年注目されている。物質の放出される量は、合成される元素の量やキロノヴァの規模に本質的に重要であるが、特に磁場によって合体後の降着円盤からどの程度の物質が放出されるかは研究が始められたばかりの問題である(Kiuchi et al. 2015)。

このようにブラックホール・中性子星連星の合体は多面的に重要な天体現象である。そこで本研究では、特にブラックホールが太陽質量の10倍程度と重く宇宙物理として現実的と思われる場合について、中性子星の磁場が連星合体や磁場増幅、ブラックホールからのエネルギー引き抜きや質量放出にもたらす影響を調べるためのシミュレーションを行う。特に、磁場増幅に極めて重要な機構である磁気回転不安定性を精度よく計算するため、少数のモデルについて高解像度での長時間計算を行う。上記(1-3)で述べた研究動機から明らかであるように、この研究は代表者が所属グループで基礎科学特別研究員として遂行している研究計画「全粒子天文学で探る中性子星の性質と重元素の起源」と密接に関係している。

参考文献

- B. P. Abbott et al., Physical Review Letters 116, 061102 (2016)
K. Kyutoku, M. Shibata, K. Taniguchi, Physical Review D 82, 044049 (2010)
K. Kyutoku, H. Okawa, M. Shibata, K. Taniguchi, Physical Review D 84, 064018 (2011)
R. D. Blandford, R. L. Znajek, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 179, 433-456 (1977)
J. M. Lattimer D. N. Schramm, The Astrophysical Journal 192, L145-L147 (1974)
L.-X. Li and B. Paczynski, The Astrophysical Journal 507, L59-L62 (1998)
K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, K. Kyutoku, M. Shibata, K. Taniguchi, T. Wada, Physical Review D 92, 064034 (2015)

今回の申請で計算する具体的な計算手法・計算内容と予測される成果

ブラックホール・中性子星連星の合体を、完全に一般相対論的な磁気流体力学シミュレーションにより計算する。一般相対論における重力場の基礎方程式であるアインシュタイン方程式および磁気流体力学の基礎方程式（連続の式・オイラー方程式・エネルギー方程式・磁場の誘導方程式・状態方程式）を連立させ、デカルト座標上の直交格子で差分化し、陽解法で解く。技術的には、アインシュタイン方程式は Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura 形式に定式化し、安定な計算を可能にしている。流体は高解像度衝撃波捕獲法によって精度を高めるとともに、Constrained Transport 法および高次の補間公式を用いて、磁気流体力学で本質的に重要な磁場の発散ゼロおよび磁束の保存という二つの条件を保証する。

このコードはグリッド構造として多層格子法(fixed mesh refinement)を採用し、十分遠くまで質量放出や重力波の伝播を解きつつ、合体後に形成される降着円盤の内部で発生する磁気回転不安定性を高解像度で計算することを、現実的なコストで実行可能にしている。特に、連星合体でよく用いられる解適合格子法(adaptive mesh refinement)での計算では、計算コストは軽くしやすいものの並列化効率を出すのが難しく、また合体後に残る降着円盤を広く高解像度で計算するには不向きであるという問題があるのに対して、我々の多層格子法計算ではどちらの問題もクリアしている(図1参照)。具体的な計算グリッドとしては、座標原点の周りにサイズが倍々になっていく相似な立方体を10個用意し、全ての立方体に同じ数だけのグリッド点を設定して計算する。つまり、外側から内側に向かって解像度は2倍になっていく。

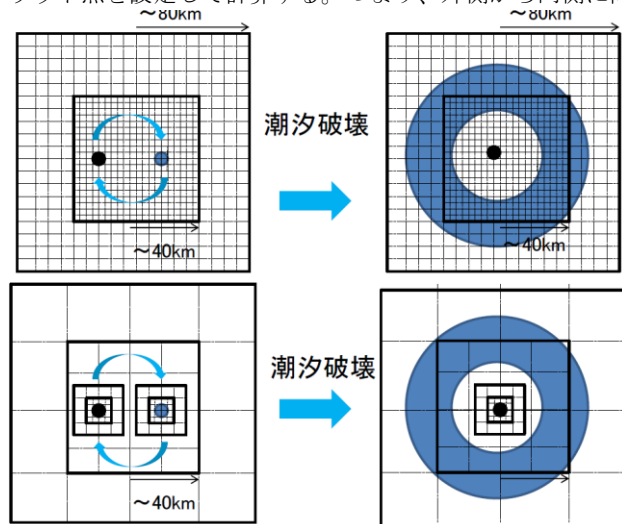


図1: (上) 本計算で用いるグリッド構造。ただしz方向は省略し、xy平面のみ記した。一番狭く、解像度の高い立方体で連星の合体前後を高解像度で計算しつつ、その周りに解像度の低いグリッドを用意して、遠方まで重力波や質量放出を計算できるようにする。また、一番深いグリッドは合体後の降着円盤を高解像度で計算し、磁気回転不安定性を改造する役割も持つ。(下) 他の連星合体に典型的な解適合格子法で用いられるグリッド構造。合体前の連星の運動に合わせて計算領域を移動させるため、合体前は高解像度かつ低コストで計算することができるが、合体後の降着円盤は改造できず、並列化のルールも複雑なものになる。

本研究では、中性子星の質量を銀河系内で観測されているものの典型的な値である1.35太陽質量に、ブラックホールの質量を銀河系内で観測されている値として標準的な9.45太陽質量にとる。このとき、ブラックホールの質量は中性子星の質量の7倍になる。ブラックホールのスピンは、理論的上限の75%を主な計算対象とし、さらにスピンへの依存性を確認するために50%の場合についても計算を行う。中性子星の状態方程式は、平均場理論に基づくH4モデル(Lackey et al. 2006)を採用する。このとき、中性子星の半径は13.6kmとなる。過去の研究により、スピンの75%のときはこのパラメータでは潮汐破壊が起こり、太陽質量の20%程度が降着円盤を形成することがわかっている(Kyutoku et al. 2015)。この降着円盤内部での磁場増幅、ブラックホールからのエネルギー引き抜き、付随する質量放出を計算することが課題である。この計算では磁気回転不安定性を解像可能になる強磁場を、中性子星内部の一番磁場の強くなるところで 10^{16} ガウス、 10^{15} ガウス、 10^{14} ガウスの3通りの強さで与え、さらに比較のために磁場をゼロにした計算も行う。この比較を通して、初期に与えた磁場の強さに大きく依存しない、形成された降着円盤での自発的な磁場増幅に伴うダイナミクスを特定し、そこに注目して解析を行う。このときさらに解像度への依存性も3通り以上の解像度の比較によって調べる。

本研究課題で使用するコードは、京コンピュータ向けにチューニング済みである。MPIおよびOpenMPによるハイブリッド並列化を行い、全体のスケールングとして4096コアから85184コアに対して並列化効率96%-97%、85184コア使用時の実効性能14.8%を達成している(ただしweak scaling)。参考論文リストに記載の成果は京コンピュータによって得られたものであり、HOKUSAIにおいても11%-12%の並列化効率が発揮されることは、簡易課題Q15312において確認した。

参考論文

B. D. Lackey, M. Nayyar, B. J. Owen, Physical Review D 73, 024021 (2006)

K. Kyutoku, K. Ioka, H. Okawa, M. Shibata, K. Taniguchi, Physical Review D 92, 044028 (2015)

