

ブラックホール—中性子星連星合体からの高精度重力波形の導出

High precision gravitational waveforms and dynamical ejecta from a black hole-neutron star merger

木内建太

マックスプランク重力物理学研究所／京都大学基礎物理学研究所

1. 研究目的

連星中性子星合体イベント GW170817 で本格的に幕を開けたマルチメッセンジャー天文学時代において、ブラックホール—中性子星連星合体を対象とした研究の重要性は増している。事実、Advanced LIGO/Advanced VIRGO のこれまでの観測結果の中には、ブラックホール—中性子星連星の候補が 3 イベント報告されている。今後の観測においてブラックホール—中性子星連星合体を峻別するためには、高精度重力波波形の導出および中性子星過剰放出物質のモデル化が重要となる。前者は重力波解析に直接適用するテンプレート作成に向けて必要なプロセスである。後者はマクロノバ・キロノバ、ガンマ線バーストといった電磁波対応天体とブラックホール—中性子星連星合体の関係性を明らかにし、同時観測の可能性を議論するために必要なプロセスである。

2. 研究成果の内容

2020 年度はブラックホール—中性子星連星合体からの高精度重力波波形の導出に向けた数値相対論シミュレーションを行った。高精度重力波波形の導出には、高速かつ高精度なアインシュタイン方程式ソルバー、中性子星の軌道運動を正確に追跡する流体ソルバー、低軌道離心率である初期条件が鍵である。本研究では、これらを実装した数値相対論 Adaptive Mesh Refinement code、SACRA-MPI を使用した。ブラックホール—中性子星連星では、質量比、ブラックホールスピン値、中性子星の状態方程式、中性子星質量が系のダイナミクスを特徴付けるパラメーターである。つまり、このパラメーター空間において様々なシミュレーションを実行する必要がある。本年度は中性子星質量を典型的な値である 1.35 太陽質量に固定し、質量比を 3, 5, 7、ブラックホールスピン値を 0, 0.5, 0.75、状態方程式を 3 種類（中性子星半径が 13.7km、12.3km、11.0km にそれぞれ対応）変えたシミュレーションを行った。15-16 サイクルの波形を導出した。波形が持つ精度を定量化するためには、中性子星及びブラックホールを解像するためのシミュレーション空間解像度を幾通りか変えなければならない。具体的には導出した重力波波形の位相進化に含まれるエラーを推定する。先行研究によりこの推定には少なくとも空間解像度を 4-5 通り変える必要があることが分かっているため、本研究ではおおよそ最細解像度が 100m, 120m, 140, 150m, 160m に

対応する収束性チェックを行った。

得られたシミュレーションデータを元にエラーを推定したところ、収束次数が 4 次を超えるモデルが存在することが判明した。本コードでは時間、空間解像度は 4 次精度である差分法を実装しているため、これは現状のデータが含む誤差は依然大きいと考えられる。誤差の原因を推定するために、SXS コラボレーショングループから提供された波形をある特定のモデルについて比較した。その結果、さらに空間解像度を上げる必要があることが判明した。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

上述の通り、ブラックホール—中性子星連星系では合体のダイナミクスを特徴付けるパラメーターが数多く存在するため、数多くのシミュレーションを実行しなければならない。また、収束性の確認も本質である。パラメーター並列及び収束性確認を実行するためには、本課題で割り当てられた計算機資源が必要不可欠であった。

4. 今後の展望

2 で述べた通り、現状の波形データが持つ精度は十分とは言い難い。一方、シミュレーションで採用した最細解像度 100m は現状の空間三次元数値相対論シミュレーションでは最も高解像度の部類に属する。これ以上空間解像度を上げることは計算機資源の観点からは非現実的であり、実効的に空間解像度を上げる方法を考えなければならない。その一つに保存形に基づいて数値流体を解くために必要な数値流速ソルバー (Riemann ソルバー) をより良質なものにアップデートすることが考えられる。現状の SACRA-MPI で実装している Riemann ソルバーでは数値散逸が大きく、特に接触不連続面を精度よく捕獲するのが難しいことが報告されている。そこで接触不連続面に強い HLLC ソルバーを SACRA-MPI に実装する。中性子星の表面は接触不連続面に相当するため、このアップデートされたソルバーを用いれば数値粘性を低く抑えることで実効的に空間解像度を上げることができると期待される。新しい Riemann ソルバーを実装したコードを誤差の推定に対して振る舞いの悪かった特定のモデルに関して再計算を行い、波形の精度に向上が見られるか確認する予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. "Alternative possibility of GW190521: Gravitational waves from high-mass black hole-disk systems", Masaru Shibata, Kenta Kiuchi, Sho Fujibayashi, Yuichiro Sekiguchi, PRD, 103 (2021) 063037
2. "Properties of the remnant disk and the dynamical ejecta produced in low-mass black hole-neutron star mergers", Kota Hayashi, Kyohei Kawaguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku and Masaru Shibata, PRD, 103 (2021) 043007
3. "Reducing orbital eccentricity in initial data of black hole--neutron star binaries in the puncture framework", Koutarou Kyutoku, Kyohei Kawaguchi, Kenta Kiuchi,

Masaru Shibata and Keisuke Taniguchi, PRD, 103 (2021) 023002

4. "Viscous evolution of a massive disk surrounding stellar-mass black holes in full general relativity," Sho Fujibayashi, Masaru Shibata, Shinya Wanajo, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku and Yuichiro Sekiguchi, PRD, 102 (2020) 123014

5. "Reanalysis of the binary neutron star mergers GW170817 and GW190425 using numerical-relativity calibrated waveform models", Tatsuya Narikawa, Nami Uchikata, Kyohei Kawaguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata and Hideyuki Tagoshi, PRR, 2 (2020) 4, 043039

6. "Post-merger Mass Ejection of Low-mass Binary Neutron Stars", Sho Fujibayashi, Shinya Wanajo, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru and Masaru Shibata, ApJ, 901, 122 (2020)

7. "Sub-radian-accuracy gravitational waveforms of coalescing binary neutron stars in numerical relativity II : Systematic study on the equation of state, binary mass, and mass ratio", Kenta Kiuchi, Kyohei Kawaguchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, PRD, 101 (2020) no. 8 084006

(2) 学会発表

特になし

(3) その他

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース※	
		当初配分	追加配分
Cygnus			
Oakforest-PACS	○	240000	
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			