

ブラックホール—中性子星合体からの高精度重力波波形の導出

High precision gravitational waveforms from black hole–neutron star binary mergers

木内 建太

マックスプランク重力物理学研究所

1. 研究目的

連星ブラックホール合体からの重力波直接観測 GW150914 に引き続き、連星中性子星合体からの重力波直接観測 GW170817 の成功は重力波天文学の創成を意味する。特に GW170817 では中性子星の潮汐変形度（ブラックホールでは厳密に0である物理量）が観測的に初めて測定され、中性子星の原子核状態方程式に制限を与えた。

中性子星を少なくとも一つ含む連星系では、合体の直前で伴星が作り出す潮汐場によって中性子星が変形する。潮汐変形を受けた中性子星の四重極モーメントが変化するため、実効的には連星間に働く重力に引力として補正が加わる。すなわち潮汐変形がないとした場合に比べ合体が早まり、結果的に重力波位相に変調を生じさせる。また、この変形の度合いは中性子星の原子核状態方程式に依存する。すなわち、重力波観測からこの位相変調を抽出できれば、潮汐変形度すなわち原子核状態方程式に関する情報を得ることが出来る。

重力波観測から位相変調を読み取るためには、重力波の高精度な理論波形が必要不可欠である。特に潮汐変形が顕著となる合体の直前では、解析的な手法は破綻するため数値相対論シミュレーションが唯一の研究手法となる。本課題では、連星中性子星合体およびブラックホール—中性子星合体の数値相対論シミュレーションを実行し、高精度理論波形を導出する。さらにそのデータを元に波形テンプレートを作成し、重力波観測データの解析に使用する。中性子星の潮汐変形度に関する情報を重力波イベント毎に（連星ブラックホールを除く）抽出し、真の状態方程式に迫ることを究極目標とする。

2. 研究成果の内容

2019年度前半は連星中性子星合体シミュレーションを中心に行った。この系を特徴づける物理量は、連星のチャープ質量、中性子星の質量比、原子核状態方程式である。観測データ解析に耐えうる高精度重力波波形を導出するために、空間解像度を数通り変え波形の収束性を確認する。2019年度前半ではチャープ質量2通り、質量比5通り、原子核状態方程式5通り、空間解像度6通りのシミュレーションを実行した。導出した重力波のシミュレーションデータは http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~nr_kyoto/SACRA_PUB/catalog.html にて公開し、当該分野の研究者が利用できるように整備した。また、シミュレーションデータを元に論文を執筆した

(arxiv:1907.03790, PRD に 2020/04/02 付けで出版)。以下に結果を要約する。我々が導出した重力波波形の精度は現存するシミュレーションデータの中で最も精度が高いものである。具体的には合体までに数値誤差によって引き起こされる重力波の位相エラーは 0.5radian 以下である。波形全体で位相自体は 200radian 程度であるので、 0.5% を切る精度である。このデータを元に重力波波形のテンプレートを作成した。具体的には重力波波形の位相及び振幅を潮汐変形度に依存する形でモデル化した。モデル化には3つの不定パラメータを導入する必要があるため、これらのある特定のシミュレーション波形を再現するよう決定した。このように構築した波形モデルが他のシミュレーション波形をどの程度の精度で再現するかモデル化の妥当性を検証した。定量的には我々の波形モデル（京都波形モデル）は、重力波周波数 1000Hz まで位相エラー 0.1radian 以下の精度を持つことが判明した。

さらに京都波形モデルを用いて、GW170817 の再解析を行った（論文 3 および arxiv:1910.08971）。結果を要約すると LIGO-Livingston と LIGO-Hanford のデータを独立に解析した場合、推定された潮汐変形度がそれぞれ 927^{+522}_{-619} , 527^{+619}_{-345} となる。この結果は将来観測に向け Detector 毎のさらなる詳細な解析の重要性を示唆する。後期はブラックホール中性子星連星合体の数値相対論シミュレーションに取り組んだ。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

上述したように観測に耐えうる高精度重力波波形を導出するには、連星を特徴づけるパラメーター、シミュレーション空間解像度を変えたシミュレーションを多数実行する必要がある。特に効率的な数値相対論コードおよび計算機資源が鍵となる。今回の学際共同利用では豊富な計算機資源が割り当てられたため、広範な連星パラメータスペースにおいて、今までにない解像度のシミュレーションを多数実行することが出来た。繰り返しになるが本プロジェクトで導出した連星中性子星合体の重力波波形は現存するもので最も高い精度を持つものとなっている。以上が学際共同利用が果たした役割と意義である。

4. 今後の展望

2019 年度までのプロジェクトにより連星中性子星合体からの重力波の波形については概ね導出を完了した。今後は波形データを使ったより良い波形モデルの構築や新たな重力波イベントのデータ解析を進めていくことになる。

次年度以降のターゲットはブラックホール中性子星合体からの重力波波形の導出である。詳細は報告されていないが LIGO は O3 と呼ばれる最新の観測フェーズ中にブラックホール中性子星連星合体の候補をいくつか観測した。連星中性子星合体とは独立なこの天体現象から放出される重力波に刻印される潮汐変形率の情報が既存の観測結果と無矛盾なのか？新たな情報をもたらし得るのか？という点は open problem である。そこで連星中性子星合体プロジェクトを踏襲し、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を今後の目標とする。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. "On the possibility of GW190425 being a black hole--neutron star binary merger", Koutarou Kyutoku, Sho Fujibayashi, Kohta Hayashi, Kyohei Kawaguchi, Kenta Kiuchi, Masaru Shibata and Masaomi Tanaka, *ApJ*, 890 (2020), L4
2. "Jet Propagation in Neutron Star Mergers and GW170817", Hamid Hamidani, Kenta Kiuchi and Kunihito Ioka, *MNRAS*, 491 (2020), 3192
3. "Discrepancy in tidal deformability of GW170817 between the Advanced LIGO twins", Tatsuya Narikawa, Nami Uchikata, Kyohei Kawaguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata and Hideyuki Tagoshi, *PRR*, 1 (2019) 033055
4. "Constraint on the maximum mass of neutron stars using GW170817 event", Masaru Shibata, Enping Zhou, Kenta Kiuchi, and Sho Fujibayashi, *PRD*, 100 (2019), no. 2, 023015
5. "Revisiting the lower bound on tidal deformability derived by AT 2017gfo", Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, Keisuke Taniguchi, *ApJL*, 876 (2019), L31
6. "Nothermal afterglow of the binary neutron star merger GW170817: a more natural modeling of electron energy distribution leads to a qualitatively different new solution", Haoxiang Lin, Tomonori Totani, Kenta Kiuchi, *MNRAS*, 453 (2019), 2155

(2) 学会発表

1. "Systematic error for the neutron star tidal deformability estimation in GW170817/AT2017gfo", **Invited speaker**, Gravitational wave searches and parameter estimation in the era of detections, Schloss Ringberg, Munich, Germany, Jan. 13-17
2. "Theoretical modeling of binary neutron star mergers; Recent progress and future prospect", **Invited colloquium speaker**, AEI-Hannover, 2019, Nov. 14
3. "Current status of a numerical modeling of binary neutron star mergers and short gamma-ray bursts", **Invited speaker**, GRB 2019, Yokohama, Japan, Oct. 28-Nov. 1
4. "Recent progress of a numerical modeling of binary neutron star mergers in numerical relativity", **Invited speaker**, CoCoNuT 2019, Astana, Kazakhstan, Sep. 18-20

5. “A theoretical modeling of EM and GW emission for binary neutron star mergers”, **Invited panelist** chaired by Prof. Rezzolla, IGC@25 Multimessenger Universe, PSU, Penn State, USA, June 24-28
6. “Revisiting the lower bound on tidal deformability derived by AT 2017gfo”, **Invited speaker and panelist**, FOE2019, NC USA, Raleigh, USA, May 20-24

(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	○	100,000	0
※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。			