

連星中性子星合体から放出される重力波の高精度波形の構築

High precision gravitational waveforms from binary neutron star merger

木内建太

京都大学基礎物理学研究所

1. 研究目的

2018年8月17日に advance LIGO と advanced VIRGO によって連星中性子星合体からの重力波が初観測された。重力波に続き、ガンマ線、紫外—可視—近赤外線、X 線、電波というほぼすべての帯域での電磁波が同時観測されたため、重力波観測の信頼性に疑う余地はない状況となった。GW170817 と名付けられたこの連星中性子星合体イベントがもたらした科学的成果は重力理論、高エネルギー天体物理学、原子核物理、宇宙論に渡る幅広いものであるが、なかでも特筆すべき点は中性子星の潮汐変形率が観測的に初めて測られたという事実である。

合体過程にある中性子星は伴星が作り出す潮汐場によって変形すると考えられる。特に合体直前には潮汐変形が顕著になるため、その効果を重力波から読み取ることができると期待されていた。潮汐変形の受けやすさ、潮汐変形度は中性子星の核密度状態方程式に依存するため、重力波に刻印される潮汐変形度を読み取るとはすなわち核密度状態方程式に制限を与えることになる。GW170817 では潮汐変形度について約 800 以下、太陽質量の 1.35 倍の中性子星の半径が約 13km 以下という制限が課された。今後様々な連星中性子星合体が観測されると期待されるため、核密度状態方程式への制限はより厳しくなるものと予想される。本プロジェクトの目的は重力波の観測信号から潮汐変形度を抽出するために必要不可欠である重力波波形の鋳型を導出することである。

2. 研究成果の内容

重力波の観測信号は非常に微弱であるため、観測雑音に埋もれた信号を取り出すためには波形の鋳型と相関を取るマッチングフィルターと呼ばれる手法が標準的である。鍵となる点は精緻な波形の鋳型の構築で、通常は Effective One Body (EOB) と呼ばれる半解析的な理論手法が用いられる。しかし、上述したように潮汐変形が顕著になる合体直前では時間変動する強重力場および流体力学的相互作用のため、この解析的手法は破綻し、数値相対論シミュレーションが唯一の手法となる。そこで本年度は AEI/京都グループが有する適合格子—数値相対論コード SACRA-MPI を使用して、広範な連星パラメータ空間および広いダイナミックレンジでの空間解像度でのシミュレーションを多数実行した。具体的にはチャープ質量 1.08819 太陽質量 - 1.17524 太陽質量、対称質量比 0.244—0.250、潮汐変形度 200—1800 という連星パラメータ空間において、空間解像度を 6 種類変えたシミュレーションを OFP を利用して実行した。その結果、250-300 の高精度波形を導出することができた。

潮汐変形度の違いは重力波の位相差として現れるため、精緻な波形鋳型を導出するためには数値誤差に起因する重力波の位相誤差を十分に低く抑えなければならない。我々の導出した重力波波形は合体までの位相誤差が約 0.5 ラジアン以下（シミュレーション全体で重力波位相は 200-250 ラジアン進化）に抑えられていることが分かった。これは現存する数値相対論シミュレーション波形で最も精度の高いものとなっている。この高精度重力波波形を基に波形の鋳型（京都波形）を構築した。具体的には EOB で得られる重力波の位相と振幅の半解析的表現に潮汐変形度とポストニュートンパラメーターに非線形に依存する現象論的項を付与する。この項の係数およびポストニュートンパラメーターの次数をある連星モデルの数値相対論波形によって決定する。続いて、京都波形を数多く導出した数値相対論波形で校正した。その結果、京都波形を用いた場合、重力波振動数 1,000Hz までの重力波位相の系統誤差が 0.1 ラジアン以下であることが示された。

さらに京都波形を用いた advanced LIGO の観測データを解析した論文を準備中である（結果の一部は [axiv:1812.06100](https://arxiv.org/abs/1812.06100) として投稿中）。重力波波形データの公開も予定しており、2019 年 4 月から始まった重力波観測 O3 のデータ解析に貢献できると期待される。

3. 学際共同利用として実施した意義

重力波をプローブとして連星中性子星合体を核物質の実験場として利用するアイデアは古くより提唱されていたが、2017 年についに実現した。高エネルギー天体物理学と原子核物理を有機的に結び付ける研究課題であり、また数値シミュレーションが必要不可欠であることから計算科学との結びつきも強い。我々の構築した理論波形鋳型はすでに実際にデータ解析に利用されており、学際共同利用として実施した意義は高い。

4. 今後の展望

2018 年度までに行ったシミュレーションの設定では中性子星の自転は考慮していなかった。これは今までに観測されている連星中性子星の自転が小さいことに動機づけされているが、重力波のデータ解析という観点からは自転を考慮した波形の導出も必要である。そこで我々は中性子星の自転を考慮したシミュレーションを計画している。スピンを考慮したシミュレーションデータに基づいて、京都波形を拡充することにより適用範囲を増やす。

またブラックホール—中性子星合体は今のところ未発見であるが、O3 やそれに続く観測で発見される可能性がある。この天体からの重力波も核密度状態方程式を探るプローブとなりえるので、高精度重力波波形の導出を計画している。

5. 成果発表

(1) 学術論文（査読付き）

1. "Synchrotron radiation from the fast tail of dynamical ejecta of neutron star mergers", Kenta Hotokezaka, Kenta Kiuchi, Masaru Shibata, Ehud Nakar, Tsvi Piran, *ApJ*, 867, 95 (2018)
2. "Mass Ejection from the Remnant of Binary Neutron Star Merger: Viscous-Radiation Hydrodynamics Study", Sho Fujibayashi, Kenta Kiuchi, Nobuya Nishimura, Yuichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata, *ApJ*, 860, 64 (2018)

3. "Repeating and non-repeating fast radio bursts from binary neutron star mergers", Shotaro Yamasaki, Tomonori Totani and Kenta Kiuchi, PASJ, 70, 39 (2018)
4. "Global simulations of strongly magnetized remnant massive neutron stars formed in binary neutron star mergers", Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi and Masaru Shibata, PRD, 97, no. 12, 124039 (2018) (Editors Suggestions)

(2) 学会発表（招待講演のみ）

1. "Frontiers in Numerical Relativity", Invited lecturer, 2019 YITP Asia-Pacific Winter School and Workshop on Gravitation and Cosmology, Kyoto, Japan
2. Invited speaker, Workshop on r-Process and Unstable Nuclei in Multi-messenger Astronomy, Riken, Wako, Japan
3. "Binary Neutron Star Merger", Invited speaker, Workshop on Jet and Shock breakout in Cosmic transient, YITP, Kyoto, Japan

(3) その他

1. 2018 Public lecture to Nara Gakuen Junior High School at YITP
2. 2018 Public lecture to Japan Association of Chemical Sensors Meeting at YITP
3. 2018 Public lecture at the annual meeting of Tomono-kai at Osaka Science Museum

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
COMA			
Oakforest-PACS	○	680,000	136,000
※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。			