

受付 ID	17a37
分野	宇宙

課題名 (和文) 連星中性子星合体からの高精度重力波導出

課題名 (英文) High-precision gravitational waveforms from binary neutron star mergers

代表者氏名 木内建太

所属 京都大学基礎物理学研究所

1. 研究目的

連星中性子星合体からの重力波には中性子星の高密度状態方程式の情報が刻印されている可能性があったため、観測された重力波からその情報を抽出することは重力波物理学における中心課題の一つであった。重力波の典型的な振幅は10のマイナス22乗程度と非常に微弱であるため、雑音が含まれる観測データから信号を検出するのは重力波波形の精緻な鋳型が必要となる。そこで理論的にはこの鋳型の構築が最重要課題となる。

一方、中性子星は連星の片方が作り出す潮汐場によって変形を受ける。この変形は合体直前に顕著となり、また変形の度合い(潮汐変形率)は中性子星高密度状態方程式に強く依存する。すなわち、連星中性子星合体からの重力波を観測し、高密度状態方程式の情報を抽出するためには合体直前に顕著になる潮汐変形の効果を適切に取り入れた波形の精緻な鋳型が必要となる。本課題では重力波観測に向けて、数値相対論シミュレーションをベースにこの鋳型の構築を行うことを第一目標とした。さらに構築した鋳型を実際の重力波データ解析に応用することを究極目標と据えた。

このような動機のもと2017年度の利用申請を行い採択されたが、2017年8月17日に連星中性子星合体からの重力波が人類史上初観測された。中性子星の潮汐変形率に初めて観測的な制限が付き、半径の小さな中性子星を予言する核物理理論が支持されている。

2. 研究成果の内容

連星中性子星がもつパラメーターは個々の質量に加え、中性子星の核密度状態方程式である。まず、連星中性子星の進化の概要を述べる。中性子星を点粒子と近似し、重力波の四重極公式を計算すると連星間距離が重力波の放出により時間とともに減少することが容易にわかる。重力波の周波数は軌道周波数の2倍で与えられるため、重力波の周波数も時間とともに増大する。これは重力波位相が時間に関して非線形に増加することを意味する。一方、中性子星を有限のサイズをもつオブジェクトとして考えた場合、上述の潮汐変形の効果が表れる。潮汐力は引力として働くため、重力波の位相進化は点粒子と近似した場合に比べ早くなる。すなわちこの位相変調を測ることが出来れば、重力波から潮汐変形率すなわち中性子星状態方程式の情報が得られる。

この位相変調を正確に導出するには数値相対論シミュレーションが唯一の方法である

が、シミュレーションには必ずエラーが混入し、このエラーがやはり位相変調を起こすためシミュレーション解像度に対する徹底した収束性のチェックが必要である。2017年度はOFPを利用して、連星質量に対して2-3モデル程度、質量比に関して2モデル、核密度状態方程式に関して5モデル、シミュレーション解像度に関して6パターンの計算を行った。シミュレーション解像度は現存する数値相対論シミュレーションの中では世界最高解像度のものである。

シミュレーションデータを解析した結果、数値エラーによって引き起こされる位相エラーは先行研究のものに比べて10倍程度良くなることが分かった。具体的には合体までに約15-16周する連星中性子星をシミュレートした結果、合体までの重力波位相は約200 rad.程度であるのに対し、我々のシミュレーション波形の精度は0.4-0.5rad.程度の位相エラーである。また、潮汐変形度の違いによる位相変調は最大合体までに3-4rad.程度である。すなわち0.5%程度の精度を持つ計算結果となっており、我々の波形は潮汐変形による位相変調を区別できる精度を保持していると結論付けられる(論文1)。また、このシミュレーションデータを元に波形の鋳型を構築した(論文2)。具体的には、現状では鋳型に含まれている潮汐変形の効果は変形度の線形項にとどまっていた点を改良した。論文1で導出した波形と先行研究で提示されている鋳型を比較した結果、変形の度合いが顕著になる合体直前では従来の鋳型が破たんすることが分かった。そこで新たな効果として潮汐変形度の非線形項を鋳型に付け加える方法を提案した。ただし、その比例係数は解析的に導出されていないため、シミュレーションデータを再現するよう現象論的に決定した(係数の決定にはある特定の連星モデルを使用)。さらにこの新たな鋳型が他のモデルに対しても適用可能であるか較正を行った結果、様々な連星モデルに対しても適用可能であることが分かった(論文2)。この鋳型を実際のデータ解析に利用する予定である。

3. 学際共同利用として実施した意義

精緻な重力波波形の導出には系統的なシミュレーションの実行が必要不可欠であり、数十のモデルが同時に実行できる本システムも利便性は非常に高かった。くしくも2017年度は連星中性子星合体からの重力波が初観測され、計算科学、宇宙物理学、原子核物理学が有機的に結び付くことが実証された。その意味でも本課題を実施できた意義は大きい。

4. 今後の展望

連星モデルをさらに拡充し、鋳型の改良を引き続き行う。特に2018度はこれまで無視してきた中性子星の自転の効果について重点的に調べる予定である

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. "Sub-radian-accuracy gravitational waveforms of coalescing binary neutron stars in numerical relativity", Kenta Kiuchi, Kyohei Kawaguchi, Koutarou Kutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, and Keisuke Taniguchi, Phys.Rev. D96 (2017) no.8, 084060

2. "Frequency-domain gravitational waveform models for inspiraling binary neutron stars", Kyohei Kawaguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata and Keisuke Taniguchi, Phys.Rev. D97 (2018) no. 4, 044044

(2) 学会発表 (すべて招待講演)

国際会議

1. Workshop/School on Recent Developments in Gravitational Waves and Astrophysics, "Introduction to a numerical modeling of binary neutron star mergers", March 30-31th, 2018, Academia Sinica, Taiwan
2. Nuclear Astrophysics in the Gravitational Wave Astronomy Era, "High precision gravitational wave from binary neutron star mergers", June 12th-16th, 2017, ECT*, Italy
3. Hot topics in General Relativity and Gravitation 3, "Numerical modeling of binary neutron star mergers", July. 31- Aug. 4th, 2017, Quy Nhon, Vietnam
4. International School, "Introduction to Numerical Relativity", Aug. 14th-20th, 2017, Hong-Kong, China

国内会議

5. Gravitational waves and electromagnetic signals from a binary neutron star merger GW170817", Innovative area workshop "Why does the Universe accelerate? - Exhaustive study and challenge for the future", Feb. 10-12th, 2018, Tohoku Univ., Sendai
6. "Numerical modeling of a central engine of short gamma-ray bursts", 2017 Innovation of research of gamma-ray burst, Nov. 21-23th, 2017, ICRR, Tokyo
7. "Numerical modeling of binary neutron star mergers and gravitational waves", The 25th Anniversary Memorial Symposium of CCS, Univ. Tsukuba "Progress and Future of Computational Sciences", Oct.10-11th, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba

(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
HA-PACS/TCA			
COMA			
Oakforest-PACS	○	1436400	57

			600
※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。			