

平成30年6月7日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05081

研究課題名(和文) 先進的重力波検出器によるコンパクト連星合体重力波のデータ解析

研究課題名(英文) Data analysis of gravitational waves from compact binary coalescences by using advanced gravitational wave detectors' data

研究代表者

田越 秀行 (Tagoshi, Hideyuki)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：30311765

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：KAGRAデータを用いて中性子星連星合体探索を行い、イベントレートの上限值を導出した。連星ブラックホール合体後に発生するかもしれないエコー重力波の波形を一般相対論的に導出した。LIGO 2台の重力波検出器で決定された方向を小口径望遠鏡で追観測することは必ずしも最適ではないことを示した。連星合体重力波観測から一般相対論からのずれを制限する可能性について調べ、1つの重力波イベントでも変形が検出出来るパラメータ領域があることが分かった。連星中性子星の合体後にできる重い中性子星からの重力波の振動数の時間進化を解析し、10Mpcで起こった場合は振動数の時間進化を5%の精度で決定出来ることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We performed the search for gravitational wave from binary neutron star coalescences and set an upper limit to the event rate. We derived gravitational wave echos produced by binary black hole coalescences. We showed that it is not optimal for small aperture optical telescopes to perform follow-up observation to the direction determined by two LIGO detectors. We investigated the possibility to restrict the deviation of gravitational waveforms from general relativity, and found that we may be able to detect deviation even with one gravitational wave event. We analyzed gravitational waveforms produced by hypermassive neutron stars produced after binary neutron star coalescences by using Hilbert-Huang transform. We found that if the event occurs within 10Mpc, it is possible to determine the frequency evolution in 5% accuracy.

研究分野：重力波宇宙物理学

キーワード：重力波 レーザー干渉計 コンパクト連星 ブラックホール 中性子星 データ解析

1. 研究開始当初の背景

レーザー干渉計重力波検出器は、一般相対性理論で予言されている重力波を検出する装置である。本研究開始当時の2015年には、米国のLIGOの2台の検出器とヨーロッパのVIRGOが検出器のアップグレードを行っていた。日本においては、KAGRAの建設が進んでおり、2015年度中の試験運転を目指していた。

2015年当時に重力波源として最有力とされていたのは連星中性子星の合体である。観測的理論的考察から、レーザー干渉計の設計感度が実現されれば、最低でも年間数イベントが検出できると考えられていた。

また、中性子星だけでなく連星ブラックホールやブラックホール中性子星連星も有力なターゲットとされていた。ただ、そのような連星の実例が発見されていなかったため、理論的な推測に頼るしかなく、予測されるイベントレートなども大きな不確定性があった。

2. 研究の目的

以上の背景のもとで、本研究は連星合体重力波探索方法を全般的に研究して行くことを目的とする。具体的には、スピンのある場合の効率的な連星合体重力波探索方法の開発やスピン効果が修正重力理論の制限に与える影響について調べる。また、2016年春に予定されたKAGRAの初めての試験運転で取得される重力波の観測データを用いた解析のためのパイプラインを構築して、解析を行う。

本プロジェクト開始後の2016年2月に、アメリカのLIGOにより重力波の初観測が発表され状況が大きく変わった。これは重力波研究にとって史上最大の重要な出来事であり、このような重大な出来事に迅速に対応し、より緊急性の高い重要な事柄について優先的に研究を行うことが必要であると判断し、研究目的に発見された連星ブラックホールからの重力波に関連した研究もおこなっていくこととした。

3. 研究の方法

(番号は雑誌論文の番号に対応する)

(1)KAGRA データ解析のためのパイプライン開発とデータ解析

KAGRAの観測に対応した連星合体重力波探索パイプラインにおいては、重力波解析で標準的なマッチドフィルター解析を行った。非ガウスノイズの除去のためのカイ2乗の計算も行った。スピンがある場合の波形計算方法について最近提案された新しい方法に基づき研究を行った。

(2)連星ブラックホール合体重力波のエコー

LIGOによって発見された連星ブラックホール合体重力波に関して、合体後に出来た1つのブラックホールから、重力波がこだま(エコー)のように何回も繰り返し到来している可能性が指摘された。そのような現象は、ホライズンのまわりに壁のような何らかの構造が存在して重力波がホライズンに吸収されずに反射されることで発生する。その報告に関しては統計的な有意さに関して疑問視する論文も存在するが、そのような可能性を量子重力との関連で主張する理論も存在するため、興味深い報告である。本研究ではもとの研究では十分に取り入れられていなかったブラックホール周辺時空が曲がった時空であるという効果を、ブラックホール摂動論によって取り入れてエコー重力波が伝搬中にどのように変形されるかについて計算を行った。

(3)小口径望遠鏡による光学追観測

LIGOによって観測された最初の3つの連星ブラックホールからの重力波イベントGW150914, LVT151012, GW151226は、LIGO2台の検出器によって発見されたものである。レーザー干渉計で波源の方向を決めるためには最低3台の検出器が必要であり、2台の検出器で決まる方向は数100平方度に広がり、非常に悪い。このような状況において小口径光学望遠鏡によって重力波発生源を追観測する場合、最適な方向について調べた。方法はLIGOの観測データやシミュレーションデータを用いて、マルコフ連鎖モンテカルロ法などのベイズ推定の手法に基づく。

(4)修正重力理論の制限

連星合体重力波波形の観測によって修正重力理論の制限がどれほど可能かについて調べた。方法は一般相対論からのずれを簡単な関数形を仮定して表す、Parametrized Post-Einsteinian (PPE) 波形を用いた。また、ベイズ統計のodds ratioを近似的に準解析的に評価する方法を用いた。LIGO, Virgo, KAGRAによって、波形の一般相対論からのずれを検出する可能性について調べた。

(5)超大質量中性子星からの重力波解析

連星中性子星の合体後には、通常よりも質量が大きい超大質量中性子星が形成される可能性がシミュレーションにより指摘されている。超大質量中性子星から放射される重力波をHilbert-Huang変換による時間周波数解析によって調べた。HHTはフーリエ変換を用いない比較的新しい時間周波数解析の手法である。

4. 研究成果

(番号は雑誌論文の番号に対応する)

(1)KAGRA データ解析のためのパイプライン開発とデータ解析

KAGRA データ解析のために独自に開発された連星合体探索パイプラインを用いて、KAGRA の実際のデータを用いて中性子星連星合体探索を行い、イベントレートの上限値の導出を行った。上限値導出の際にはノイズだけで生じるバックグラウンド分布の推定が重要な問題であるが、それに対して、1台検出器のトリガー分布のフィッティングによるバックグラウンド推定を行った。また、得られた中性子星連星合体イベントトリガーの時刻と、KAGRA 検出器の補助チャンネルデータとの相関解析を行った。その結果、入射光学系モードクリーナーの制御信号と主干渉計信号との間に非線形相関があることが分かった。この結果はKAGRA 検出器の感度や安定性向上に役立てられる。また、スピンありの現象論的な波形である IMRPhenomD と呼ばれる波形計算コードを開発した。それは2019年以降のKAGRA データ解析で用いられる。

(2)連星ブラックホール合体重力波のエコー

連星ブラックホール合体により形成される新しいブラックホールホライズンの外側で反射される重力波が、反射を繰り返す中で時空の曲がりの効果により波形がどのように変形するかを、ブラックホール摂動法により評価した。その結果波形は有意に変形し、変形した波形をテンプレートとしてマッチドフィルターを行った場合10%程度信号雑音比が向上することが分かった。

(3)小口径望遠鏡による光学追観測

2台の検出器によってコンパクト連星合体重力波を検出する場合には、方向の決定精度が非常に悪い事が知られている。そのような状況で、小口径の光学望遠鏡によって対応天体を探す場合の最適な方向はどうかについて調べた。その結果、2台検出器によって決まる最も確率の高い方向を探索することは必ずしも有利ではないことを示した。それは、多くの場合確率が最も高い方向は、波源の距離が遠方であるため、小口径望遠鏡では対応天体の検出は暗くて検出が困難であるからである。公開されているデータを用いて、LIGOの最初の3つの重力波イベントの再解析を行い、確率的には低くてもより近傍に限ると、最も有利な方向は、2台検出器によるもともと確率が高い方向とは全く別の方向となることを示した。

(4)修正重力理論の制限

連星合体重力波波形の観測によって修正重力理論の制限がどれほど可能かについて、一般相対論からのずれを簡単な関数形を仮定して表す、Parametrized Post-Einsteinian (PPE) 波形の係数について、ずれを検出する可能性について議論した。その結果、現在の連星パルサーの観測から制限されていないパ

ラメータ領域について、1つの重力波イベントでも変形が検出出来る領域があることが分かった。

(5)超大質量中性子星からの重力波解析

連星中性子星の合体後には、1つの重い中性子星が少なくとも短時間の間形成されることが、数値相対論シミュレーションの結果として言われている。その中性子星は高速回転しており、2から3kHzの重力波を放出する。その重力波の振動数の時間進化を、Hilbert-Huang 変換(HHT)という時間周波数解析の手法を用いて解析を行った。その結果、イベントが10Mpcで起こった場合は、振動数の時間進化を5%の精度で決定出来ることが分かった。この精度は1.8倍の太陽質量の中性子星の半径を1kmの精度で決定出来ることに対応している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

(1) T. Akutsu et al. (KAGRA Collaboration, 著者は277名, アルファベット順), Construction of KAGRA: an Underground Gravitational Wave Observatory, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2018, 013F01 (2018).

DOI:10.1093/ptep/ptx180

(2) Hiroyuki Nakano, Norichika Sago, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, Black hole ringdown echoes and howls, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2017, 071E01 (2017).

DOI:10.1093/ptep/ptx093

(3) Tatsuya Narikawa, Masato Kaneyama, Hideyuki Tagoshi, Optimal follow-up observations of gravitational wave events with small optical telescopes, Physical Review D 96, 084067 (2017).

DOI:10.1103/PhysRevD.96.084067

(4) Tatsuya Narikawa, Hideyuki Tagoshi, Advanced ground-based gravitational-wave detectors' potential to detect generic deviations from general relativity, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2016, 093E02 (2016).

DOI:10.1093/ptep/ptw126

(5) Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hirota Takahashi, Youichiro Sekiguchi, Hideyuki Tagoshi, Masaru Shibata, Analysis of gravitational waves from binary neutron star merger by Hilbert-Huang transform, Physical Review D 93, 123010 (2016).

DOI:10.1103/PhysRevD.93.123010

他1件

〔学会発表〕(計 11 件)

- 田越秀行, " Status and prospect of KAGRA , The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (2017)
- 田越秀行, Search for gravitational waves from coalescing compact binaries , Symposium on "New development in astrophysics through multi-messenger observations of gravitational wave sources"(2017)
- 田越秀行, 重力波研究の現状, 重力波源電磁波対応天体探索への期待, 研究会「木曾広視野サーベイと京都 3.8m 即時分光によるタイムドメイン天文学の推進」(2017)
- 田越秀行, 重力波観測の現状と近未来, 研究会「連星中性子星・ブラックホールを含む重力波源の電磁波対応天体」(2017)
- 田越秀行, 重力波観測の現状と今後の展望, 超巨大ブラックホール研究推進連絡会第 4 回ワークショップ (2016)
- 田越秀行, Status of KAGRA DAS group and the compact binary coalescence search tasks ,The First International meeting on KAGRA (2016)
- 田越秀行, iKAGRA データ解析: 連星合体重力波探索(1), 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016)
- 田越秀行, Status of KAGRA Data Analysis Group ,新学術領域重力波天体シンポジウム (2016)
- 田越秀行, 重力波による宇宙の観測とデータ解析, 統計関連学会連合大会 (2015)
- 田越秀行, Preparation for the gravitational wave observation with KAGRA , 18th Capra Meeting on Radiation Reaction in General Relativity (2015)
- iKAGRA へ向けた解析パイプライン開発状況, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015)

〔その他〕

日本語雑誌

- 田越秀行, 中村卓史, 「重力波の初の直接検出とその意義」, 日本物理学会誌, 71, 210-211 (2016)
- 田越秀行, 「重力波天文学の幕開け」, パリティ, 31, 19-24 (2016)
- 田越秀行, 「重力波天文学」, パリティ, 32, 56-58 (2017)
- 田越秀行, 伊藤洋介, 端山和大, 「重力波の観測とデータ解析」, 72, 158-166 (2017)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田越 秀行 (TAGOSHI HIDEYUKI)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号: 30311765

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

成川 達也 (NARIKAWA Tatsuya)

内潟 那美 (UCHIKATA Nami)

金山 雅人 (KANEYAMA Masato)

譲原 浩貴 (YUZURIHARA Hirotaka)