

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540309

研究課題名(和文)重力波のデータ解析法とブラックホール摂動論の研究

研究課題名(英文)Gravitational wave data analysis and the black hole perturbation

研究代表者

田越 秀行 (Tagoshi, Hideyuki)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30311765

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：コンパクト連星合体重力波をレーザー干渉計重力波検出器ネットワークで検出する場合のパラメータ決定精度を調べた。その結果、ショートガンマ線バーストに付随する連星合体重力波が検出できた場合には、高次変調モードを取り入れた理論波形を用いて解析することで、連星の軌道傾斜角を3度から7度の精度で決定できることが分かった。

また、ブラックホール周りの赤道面上に円状の回転リングがある場合に生じる重力場の摂動を、Teukolsky方程式とCCK形式によって計算し、CCK形式を用いて具体的に重力場を求める際の問題点について有用な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：We considered the parameter estimation accuracy of gravitational waves from coalescing compact binaries with a network of laser interferometric gravitational wave detectors. Especially, we investigated the effect of the higher order modulation of gravitational waves from binaries. We found that the use of wave forms which contain higher order modulation effects are most effective to determine the inclination angle of orbital plane. We also found that, if we could detect gravitational waves from coalescing compact binaries which are associated with short gamma ray burst, we can determine the inclination angle of binaries's orbital plane with accuracy of 3 to 7 degree. We computed the perturbation of gravitational fields produced by a rotating mass ring on the equatorial plane around a black hole. We used the Teukolsky equation and the CCK formalism to obtain the gravitational fields. We obtained various useful technical information in the CCK method.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：重力波 一般相対論 重力波検出器 ブラックホール 中性子星 データ解析 宇宙物理学

1. 研究開始当初の背景

(1) 重力波観測

重力波はアインシュタインの一般相対性理論で予言されている、時空のゆがみが波動として伝搬する現象である。重力波の直接検出を目指して、第2世代のレーザー干渉計重力波検出器の建設がアメリカ、ヨーロッパ、日本で進められている。日本では岐阜県の神岡鉱山に LCGT(後に KAGRA と命名された)の現在建設が進んでいる。これら地上レーザー干渉計重力波検出器では、中性子星やブラックホールからなる連星系の合体や超新星爆発といった天体現象からの重力波の検出が期待されている。重力波観測においては、世界各地の複数の検出器を用いた観測の重要性が極めて高い。何故なら、重力波の到来方向の決定や全天からの重力波を捉えるためには、異なる場所に設置された3台以上の検出器が必要不可欠だからである。

(2) ブラックホール摂動論による重力波の理論的研究

ブラックホール時空における重力波の理論的計算方法の一つとして、ブラックホール摂動法がある。この方法では、ブラックホールの周りをより小さな星が運動する際に放出される重力波が計算出来る。この問題に関する一般相対性理論における未解決の理論的課題として、小さな星の運動に対する自己重力効果を取り入れた重力波計算がある。星の自己力は重力波放射の反作用効果も含まれ、星の運動に大きな影響を与えるため、それにより重力波波形も影響される。これは、将来計画である宇宙空間レーザー干渉計のターゲットの一つである、大きなブラックホールにより小さなブラックホールや中性子星が公転運動しながら落下していく際に放出される重力波の高精度の理論的計算のために必要なものである。

2. 研究の目的

(1) 複数検出器による重力波データ解析方法

本研究の1つめの課題は、コンパクト連星合体重力波の探査のため、複数台の地上レーザー干渉計重力波検出器からのデータを最尤法に基づいて解析を行う方法についての研究である。この方法では異なる検出器データにおける波の位相情報を有効に活用できるため、コヒーレント解析と呼ばれる場合もある。このコヒーレント解析における様々な問題点について研究を行う。1つは非定常非ガウスノイズの影響の除去の問題である。もう1つは、コヒーレント解析によってコンパクト連星合体重力波のパラメータがどの程度の精度で決定できるかを評価することであ

る。

(2) ブラックホール摂動論による重力波の理論的研究

本研究の2つめの課題は、ブラックホール時空を運動する小さな星の自己力を計算するための基礎研究である。この自己力を計算するためには、星によって生じる重力場の摂動を計算する必要があるが、回転のあるカーブブラックホールの場合に摂動重力場を計算する手法として Teukolsky 方程式によって曲率摂動を求めた後、CCK 形式と呼ばれる方法で、メトリック摂動を求める方法がある。この方法は具体的な計算例がこれまで非常に少ないため、CCK 形式によるメトリック摂動の計算について、簡単な状況を設定して計算を行い、CCK 形式を具体的な計算に適用する際の問題点を探る。

3. 研究の方法

(1) 複数検出器による重力波データ解析方法

重力波の解析で問題となる非定常非ガウスノイズの選別方法として、従来のカイ2乗の方法を改良した方法について考察する。また、コンパクト連星合体重力波の解析で従来あまり用いられてこなかった高次変調モードを含む完全なポストニュートニアン波形(FWF)を考える。これと従来用いられてきている制限された波形(RWF)を用いて複数台検出器での解析を行った場合にコンパクト連星合体重力波波形のパラメータ決定精度がどの程度変わるかを定量的に調べる。パラメータ決定精度の評価は、Fisher 行列を用いる。

(2) ブラックホール摂動論による重力波の理論的研究

Teukolsky 方程式+CCK 形式による摂動重力場の計算の第一歩として、ブラックホールの赤道面に円状の回転リングを置いた場合に生じる摂動重力場の計算を行う。シュバルツシルドブラックホールとカーブラックホールのそれぞれについて計算を行う。この問題は時間的に定常な状況設定となるため、時間依存性をすべて無視できるため、計算が非常に簡単化される利点がある。

4. 研究成果

(1) 複数検出器による重力波データ解析方法

(a) コンパクト連星合体重力波の高次変調モードを含む完全なポストニュートニアン波形(FWF)を用いた、パラメータ決定精度について、Fisher 行列を用いた計算を行った。特にブラックホール中性子星連星について調べた。ソースの天球面上の位置、連星の軌道

傾斜角の様々な場合について乱数を用いてシミュレーションを行った。その結果、高次変調モードの効果は軌道傾斜角の決定精度向上に最も有効に働くことが分かった。また、ショートガンマ線バーストに付随する連星合体重力波が検出できた場合に、電磁波観測による天球面上の位置と距離の情報が、軌道傾斜角の決定精度向上にどの程度影響するかを調べた。その結果、KAGRA を含む4台の検出器では軌道傾斜角は平均すると約3度から7度の精度で決定できることが分かった。

(b)連星合体重力波探査のノイズ選別方法開発のためには検出器ノイズの統計的性質の詳細な理解が必要であるために、TAMA300 検出器データのノイズの統計性について調べ、非ガウス性や頻繁に発生するグリッジなどを確認した。それらの一部は従来知られていなかったノイズである。次に主要なノイズ選別方法であるカイ2乗テストについて、周波数領域でデータを分割する方法について異なる2つの方法について調べた。その2つは、(1)ノイズパワースペクトラムの積分値が等しくなるように分ける方法、(2)ノイズパワースペクトラムの逆数の積分値が等しくなるように分ける方法、である。その結果、(1)では良いノイズ選別ができず、(2)は従来の方法と同等のノイズ選別が可能である事が分かった。

(c) 複数レーザー干渉計検出器による解析に関連して、複数検出器データを用いたラジオメトリ探査によって、おとめ座銀河団中の多数のパルサーからの重力波の重ね合わせがホットスポットとして検出される可能性について調べた。その結果、パルサーの平均楕円率が10のマイナス5乗程度であれば、LIGO, VIRGO, KAGRA といったレーザー干渉計ネットワークによって検出できる可能性があることを、解析的評価によって示した。

(2)ブラックホール摂動論による重力波の理論的研究

シュバルツシルド、及びカーブラックホール周りの赤道面上に円状の回転リングがある場合の摂動重力場をTeukolsky方程式+CCK形式によって求めた。この計算においては、リング半径の位置で非物理的な不連続性が発生するという問題がある。我々はこの問題に対して、低次の調和モードの加え方を工夫し、リング半径の外側の赤道面上での不連続性を許すことで、リング半径での不連続性を取り除くことが出来ることを示した。本研究は、CCK形式を使って行った数少ない具体的な研究例の1つである。

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 5 件)

(1)Sanjeev Dhurandhar, Hideyuki Tagoshi, Yuta Okada, Nobuyuki Kanda, Hirotaka Takahashi

“Cross-correlation search for a hot spot of gravitational waves”

Physical Review D 84, 083007, (2011)

査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.84.083007

(2) Soichiro Isoyama, Ryuichi Fujita, Norichika Sago, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka

“Impact of the second-order self-forces on the dephasing of the gravitational waves from quasicircular extreme mass-ratio inspirals”

Physical Review D 87, 024010 (2013)

査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.87.024010

(3)Hideyuki Tagoshi, Chandra Kant Mishra, Archana Pai, K. G. Arun

“Parameter estimation of neutron star-black hole binaries using an advanced gravitational-wave detector network: Effects of the full post-Newtonian waveform”

Physical Review D 90, 024053 (2014)

査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.90.024053

(4)K. G. Arun, Hideyuki Tagoshi, Chandra Kant Mishra, Archana Pai

“Synergy of short gamma ray burst and gravitational wave observations: Constraining the inclination angle of the binary and possible implications for off-axis GRBs”

Physical Review D 90, 024060 (2014)

査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.90.024060

(5)Yasumichi Sano, Hideyuki Tagoshi

“Gravitational field of a Schwarzschild black hole and a rotating mass ring”

Physical Review D 90, 044043 (2014)

査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.90.044043

〔学会発表〕(計 5 件)

(1) Hideyuki Tagoshi
“ Search for gravitational wave events with KAGRA and the world-wide network of laser interferometers in the advanced detector era ”
RESCEU Symposium on General Relativity and Gravitation
2012年11月14日
東京大学理学研究科(東京都文京区)

(2) Hideyuki Tagoshi
“ Constraining the orbital inclination of NS-BH mergers using a multi-detector network of GW detectors ”
Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop
2013年12月18日
Pune (India)

(3) Hideyuki Tagoshi,
“ Parameter estimation accuracy of gravitational waves from inspiraling compact binaries using a network of laser interferometers ”
Yukawa International Seminar 2013:
Gravitational waves - Revolution in Astronomy and Astrophysics
2013年6月3日から7日
京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)

(4) 田越秀行
「KAGRA データ解析：データ解析パイプライン開発状況」
日本物理学会
2014年9月20日
佐賀大学(佐賀県佐賀市)

(5) 田越秀行
「大型低温重力波望遠鏡 KAGRA: 全体報告」
日本天文学会
2015年3月21日
大阪大学(大阪府豊中市)

〔その他〕
ホームページ
<http://vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp/~tagoshi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
田越 秀行 (Hideyuki Tagoshi)
大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：30311765