

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14282

研究課題名（和文）宇宙ひもの検証へ向けた重力波データ解析体制の構築

研究課題名（英文）Developing data analysis methods for gravitational waves from cosmic strings

研究代表者

黒柳 幸子 (Kuroyanagi, Sachiko)

名古屋大学・高等研究院（理）・特任助教

研究者番号：60456639

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：Advanced-LIGOによる重力波初直接検出により、重力波観測の体制が加速して整いつつある。重力波実験は、天体物理検証の新しい窓となるだけでなく、宇宙ひも探索の強力な手段であり、現存の探索法よりも圧倒的に良い感度で宇宙ひもを検証できる。本研究課題では、数年内に得られる次世代検出器の重力波データから、宇宙ひもの情報を取り出すための理論研究およびデータ解析体制の構築に取り組んだ。理論・データ解析手法の両面において将来の重力波実験に向けた準備を整えることで、宇宙ひもに関してより多くの情報を引き出し、宇宙ひもに対してより精密な制限を与えることが可能になる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙ひも起源重力波のデータ解析を扱うグループは世界的に見ても少なく、データ解析で検証できる点が全て詰められているとは言い難い。日本でも重力波実験KAGRAの建設が進む中、宇宙ひも重力波のデータ解析コードの開発が進んでいない現状があり、本研究が進むことでその体制を整えることができる。また、本研究によって将来的に重力波実験によって宇宙ひもに対する観測的制限をより強めていくことができれば、生成機構の宇宙相転移や超弦理論などの、加速器では到底届かないようなエネルギーの物理現象を検証することができる。

研究成果の概要（英文）：The gravitational wave observation is growing rapidly after the first detection of gravitational waves by Advanced-LIGO. Not only it opened a new window of astrophysics, but also it provided a powerful tool of testing cosmic strings, which in principle could go far beyond the current sensitivities of other cosmological observations. In this project, we worked on both theoretical studies and data analysis for cosmic strings to place constraints on them using next-generation gravitational wave experiments. By working from the both theoretical and experimental side, we aim to obtain more information and place more thorough constraints on cosmic strings.

研究分野：宇宙物理

キーワード：宇宙ひも 重力波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Advanced-LIGO による重力波初直接検出により、重力波観測の体制が加速して整いつつある。研究開始当時、神岡鉱山に建設中(2020年2月に観測を開始)であった大型低温重力波望遠鏡 KAGRA をはじめ、欧州(2017年8月に観測を開始)やインドでも重力波検出器の建設計画が進められ、世界的な重力波検出器ネットワークによって高精度な重力波探索が可能な時代が近づいている。さらに、2030年代には欧州の LISA や日本の DECIGO など、衛星を用いた高感度の重力波実験も計画されており、重力波による深宇宙の観測が期待されている。また、重力波の検証は干渉計実験の他にも、大型電波望遠鏡 SKA を用いたパルサータイミング法や、宇宙背景放射の B モード偏光など間接的に検証する方法があり、各実験とも年々感度の向上が進められている。それぞれ種類の違う重力波実験は、異なる周波数帯で重力波を検証するため、宇宙の情報を得る上で互いに補い合う関係にある。

2. 研究の目的

重力波実験は、天体物理検証の新しい窓となるだけでなく、宇宙ひも探索の強力な手段であり、現存の探索法よりも圧倒的に良い感度で宇宙ひもを検証できる。宇宙ひもは、初期宇宙の真空の相転移や、超弦理論に基づくインフレーションモデルから予言される一次元のひも状の位相欠陥である。現段階で観測的証拠はないものの、宇宙ひもに対する制限は初期宇宙理論に有用な示唆を与える。宇宙ひもは光を出さず重力的な相互作用が小さいため、電磁波観測による探索が難しい。一方で重く光速に近い速度で運動する宇宙ひもは、強いバースト状の重力波を放出するため、重力波実験は電磁波を使った探索よりも圧倒的に強い制限を与える。本研究課題では、次世代検出器やパルサータイミングの最新の重力波データから、宇宙ひもの情報をより効率よく取り出すためのデータ解析体制の構築に取り組む。理論・データ解析手法の両面を改良することで、従来よりも良い精度での宇宙ひも探索を可能にすることを目指す。

3. 研究の方法

本研究計画では、将来の重力波実験による宇宙ひも探索から、より良い制限を得るための理論研究を展開する。また、実際のデータ解析に取り組むことで、将来的に具体的に宇宙ひもへ制限を与える準備を整えていく。

A. 宇宙ひもに関連する理論研究

宇宙ひもが放出する重力波の強度やその特徴を正確に予測することで、将来的に重力波に対する観測的制限を宇宙ひもに対する制限に正しく焼き直すことができる。特に本研究課題では、これまで考えられてこなかった宇宙ひも上のキंकと呼ばれる特異点構造から発生する重力波の強度を見積もり、将来の観測に向けてより詳細な理論予言を与える。

B. 重力波直接検出実験

近い将来に稼働を開始する日本の重力波実験 KAGRA を用いて、宇宙ひも起源の重力波に制限を与えるために、KAGRA コラボレーションのメンバーとして宇宙ひもからのバースト重力波のデータ解析コードを開発する。宇宙ひもからの重力波は特徴的な波形を持つため、その波形のテンプレートをを用いて目的の重力波シグナルを取り出すマッチドフィルター法を基盤とする。

C. パルサータイミング

熊本大学のグループ、およびオーストラリアの Parkes パルサータイミングのチームのメンバーと共同で、Parkes 望遠鏡の観測データを使って、パルサータイミング法により宇宙ひもからのバースト重力波を探索するデータ解析を行う。解析には、広く使われているオープンソースコードの TEMPO2 を用い、重力波のテンプレート部分を書き換えることで、宇宙ひも探索に対応させる。

4. 研究成果

A-1. 宇宙ひも上のキंकから放出される重力波の見積もり

無限に長い宇宙ひも上のキंकと呼ばれる特異点は、宇宙ひも同士のつなぎ代わりの際に作られ宇宙ひも上を伝播する。本研究では、数値計算を使って宇宙ひも上のキंकの分布を詳細に予測し、キंक同士の衝突によって生じる背景重力波の強度を見積もった。その結果、従来考えられていたよりも、はるかに強度の高い重力波が作られることが明らかになり、地上型重力波検出器で検証できることを示した。

さらにその発展研究として、宇宙ひもネットワーク上に三叉構造が存在する場合に、キंकの分布がどのように変化し、背景重力波がどのような影響を受けるかを調べた。その結果、キंकが三叉構造を通ると、数は増えるものの尖り度合いが減るため、総合的に背景重力波の強度が落ちることが明らかになった。

A-2. 宇宙ひも上のカスプから放出される重力波の見積もり

宇宙ひものループ上で特殊な条件が揃った時に生じるカスプと呼ばれる特異点は、生じた瞬間に強い重力波バーストを放つことが知られており、これまで数多くの先行研究によって重力波強度の見積もりが行われてきた。本研究では LISA cosmology working group の活動に参加し、

これまでに提案されている3つの異なる宇宙ひもネットワークモデルの場合について、それぞれ重力波強度を計算し、比較した。これまで各グループが独立に提案してきたそれぞれのモデルを、宇宙論パラメータなどの条件を揃えて、統括的に比較する試みは初めてであり、本研究を通してネットワークモデルによって生じる違いを詳細に明らかにすることができた。また、将来の重力波実験において各モデルの検証が可能であるか理論的な予言を与えることができた。

A-3. String Cloud の宇宙論への示唆

String Cloud と呼ばれる宇宙ひもが束状に重なった構造が、Higgs 場の崩壊を早める触媒効果の役割を果たす場合の崩壊率を計算した。その結果、宇宙ひもの張力が崩壊率と関連していることが明らかになり、Higgs 場の崩壊が始まっていない現在の宇宙が存在するためには、宇宙ひもの張力が十分小さくなくてはならず、その値は現在の重力波によって与えられている上限と矛盾のないことを示した。

B. KAGRA におけるデータ解析

日本の重力波実験 KAGRA のコラボレーションに参加し、宇宙ひもからの重力波バーストを探索するための、データ解析コードの開発を進めた。KAGRA 独自のデータ解析ライブラリ KAGALI を用いてコード開発に取り組み、マッチドフィルター解析に基づいて、宇宙ひもからのシグナルを探し出すデータ解析コードを完成させた。さらに、2台の検出器間でイベントの到来時刻のタイミングが近いものを取り出すことができるようコードを改良し、公開されている LIGO O1 の検出器2台分のデータを解析して、コードの動作チェックを済ませた。これによって将来的に KAGRA も含めた重力波検出器ネットワークのデータを解析し、宇宙ひもに対して新しい制限をつけていくための準備が整った。

C-1. パルサータイミングを用いた低周波数帯重力波の新しい検出法

熊本大学のグループと共同で、パルサーのスピンドウン率を用いて、従来パルサーで検証することのできる 10^{-9}Hz よりも低い周波数帯の重力波を検出する方法を考案した。従来のパルサータイミングは、電波パルスの到着時間のずれを測ることで重力波に制限を与えるが、本研究ではずれの時間変化に着目し、パルサーのスピンドウン率の分布を用いて、重力波による四重極パターンを探索することで、低周波数の重力波に制限を与えることができることを示した。まずはシミュレーションを行って、実際に重力波への制限が得られることを確かめ、次に実際の ATNF パルサーカタログを用いて、重力波強度に制限を与える解析を行い、 10^{-12} から 10^{-9}Hz の周波数帯の重力波に実際に上限を与えることができた。本研究により得られた重力波の上限は決して宇宙論に対して強い示唆を与えるものではないものの、この周波数帯の重力波に制限を与える実験は他にはなく、本研究によってパルサータイミングの新たな可能性が広がったと言える。

C-2. パルサータイミングによる宇宙ひもバースト探査

熊本大学のグループ、およびオーストラリアの Parkes パルサータイミングのチームのメンバーと共同で、パルサータイミングのデータを解析して、宇宙ひも上のカスプ起源のバースト重力波を探索する研究を進めた。宇宙ひもからの重力波バーストは特徴的な波形をしているため、その波形の痕跡を電波パルスの到着時間のずれのデータから探した。解析を行った。探索の結果、4つのイベント候補が見つかったが、精査の結果、4つともノイズモデルが確立していないパルサーが原因とみられたため、重力波の検出という結論には至らなかった。一方、重力波が検出されなかったことから、宇宙ひもの重要なパラメータである張力に上限を与えることができた。今回得られた制限は、これまでのパルサータイミングで背景重力波の探索から得られていた制限よりも弱かったものの、パルサータイミングによる宇宙ひもバースト探査は世界的に見ても初めての試みであり、バーストとして観測できる近傍の宇宙ひもに対して、これまでとは全く独立な制限を与えられた点は意義深い。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsui Yuka, Kuroyanagi Sachiko	4. 巻 100
2. 論文標題 Gravitational-wave background from kink-kink collisions on infinite cosmic strings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123515
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.123515	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kumamoto Hiroki, Imasato Yuya, Yonemaru Naoyuki, Kuroyanagi Sachiko, Takahashi Keitaro	4. 巻 489
2. 論文標題 Constraints on ultra-low-frequency gravitational waves with statistics of pulsar spin-down rates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3547 ~ 3552
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1093/mnras/stz2321	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Auclair Pierre, Blanco-Pillado Jose J., Figueroa Daniel G., Jenkins Alexander C., Lewicki Marek, Sakellariadou Mairi, Sanidas Sotiris, Sousa Lara, Steer Dani?le A., Wachter Jeremy M., Kuroyanagi Sachiko	4. 巻 2020
2. 論文標題 Probing the gravitational wave background from cosmic strings with LISA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 034 ~ 034
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1088/1475-7516/2020/04/034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koga Issei, Kuroyanagi Sachiko, Ookouchi Yutaka	4. 巻 800
2. 論文標題 Instability of Higgs vacuum via string cloud	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135093 ~ 135093
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.135093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yonemaru Naoyuki、Kumamoto Hiroki、Takahashi Keitaro、Kuroyanagi Sachiko	4. 巻 478
2. 論文標題 Sensitivity of new detection method for ultra-low frequency gravitational waves with pulsar spin-down rate statistics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty976	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 黒柳幸子
2. 発表標題 GW background from kink-kink collisions on infinite cosmic strings
3. 学会等名 3rd Korea-Japan bilateral workshop on String axion cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒柳幸子
2. 発表標題 Searching for gravitational waves with pulsars
3. 学会等名 6th Korea-Japan workshop on dark energy at KMI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒柳幸子
2. 発表標題 GW background from kink-kink collisions on infinite cosmic strings
3. 学会等名 3rd Cosmological Olentzero Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒柳幸子
2. 発表標題 Search for ultra-low frequency GWs with pulsar spin down rates
3. 学会等名 4th Korea-Japan bilateral workshop on String axion cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒柳幸子
2. 発表標題 Gravitational waves from cosmic strings
3. 学会等名 COST CA18108 First Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒柳幸子
2. 発表標題 Matched filtering search for gravitational wave bursts from cosmic strings 2
3. 学会等名 20th KAGRA face-to-face meeting (ポスター発表)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒柳幸子
2. 発表標題 Matched filtering search for gravitational wave bursts from cosmic strings
3. 学会等名 The 6th Korea-Japan workshop on Dark Energy, Korea Astronomy and Space Science Institute (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒柳幸子
2. 発表標題 パルサータイミングによる重力波検出
3. 学会等名 日本SKAパルサー・突発天体研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒柳幸子
2. 発表標題 Matched filtering search for gravitational wave bursts from cosmic strings
3. 学会等名 18th KAGRA face-to-face meeting (ポスター発表)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黒柳幸子
2. 発表標題 Gravitational waves from the early Universe
3. 学会等名 Summer Institute 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黒柳幸子
2. 発表標題 Gravitational waves from the early Universe
3. 学会等名 2017 Summer Mini-School of Gravitational Wave Research (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 安東正樹、白水徹也、浅田秀樹、石橋明浩、小林努、真貝寿明、早田次郎、谷口敬介	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 432
3. 書名 相対論と宇宙の事典 (6.3 宇宙背景重力波)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高橋 慶太郎 (Takahashi Keitaro)	熊本大学・自然科学研究科・准教授	