

令和元年6月10日現在

機関番号：32686

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17695

研究課題名（和文）数値宇宙論で探る初期宇宙の姿

研究課題名（英文）Surveying the early Universe in numerical cosmology

研究代表者

平松 尚志（HIRAMATSU, Takashi）

立教大学・理学部・ポスドクトラルフェロー

研究者番号：50456175

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）：極初期宇宙（概ね宇宙が誕生した直後から38万年後頃までの宇宙）には、インフレーション、宇宙再加熱、真空の相転移など、様々な超高エネルギー現象が存在します。宇宙マイクロ波背景放射や宇宙背景重力波の観測から、その極初期宇宙の姿をどの程度明らかにすることが可能であるか、数値シミュレーションを実際に行うことで定量的にそれを評価しました。また、一般相対性理論を超える重力理論にも着目し、一般相対性理論からのずれを将来の観測からどの程度同定できるかについても研究を行いました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、形式的な議論もしくは定式化しかされていないような様々な初期宇宙の理論を、場の理論的シミュレーションやCMBボルツマンソルバーを使って実際にシミュレーションすることで、様々な宇宙観測に対する理論予言を定量的に行った点に意義が有ります。観測機器の能力の飛躍的な向上が見られる近年、理論側でもこのような本研究のような具体化がより進むよう一石を投じることができたと考えています。

研究成果の概要（英文）：In the extremely early Universe, the Universe experienced the extremely high-energy phenomena such as inflation, the reheating process, and the phase transition of vacuum states. In this research, we focused on the high-precision observations of the cosmic microwave background (CMB) and the future observations of the gravitational wave background with space-borne detectors to survey such high-energy phenomena. In particular, we put emphasis on estimating how well we can extract their information from the observations quantitatively using the field-theoretic simulator and the CMB Boltzmann solver that I have been developing. Moreover, we also focused on the generalised theories of gravity beyond the General Relativity (GR) which affect the generation and propagation of gravitational waves, and estimated to what extent we can see the differences from GR.

研究分野：宇宙論

キーワード：宇宙論 重力波 宇宙マイクロ波背景放射 修正重力理論 宇宙紐 数値宇宙論 インフレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙の96%を満たす「ダークエネルギー」や「ダークマター」の正体解明に向けて、宇宙論、天体物理学、素粒子論の分野を越えて様々な角度から研究が行われています。その中で研究代表者は、第一原理的な数値シミュレーションを中心に展開する宇宙論を「数値宇宙論」と定義し、既存の宇宙論を新たな角度から見直すことを目指して平成23年度～25年度科研費(若手研究B)でその基礎研究を行いました。本研究では、数値宇宙論の実践的研究として、「場の理論的シミュレーションによる初期宇宙の再現」をテーマに掲げて諸課題に取り組みます。

宇宙が生まれて間もなくの時代は、今よりも大変多くの種類の場が宇宙を構成していました。たとえば、スカラー場の一つであるヒッグス場は、自発的対称性の破れを経て相転移を引き起こし、様々な素粒子の質量の起源となったと考えられています。こういった真空の相転移の際には、宇宙紐やドメインウォールといった、宇宙論的スケールでかつ大質量のソリトン状の物体が残ることがあります(論文3-9, 11)。これらは、宇宙マイクロ波背景放射(宇宙誕生から38万年後の放射、論文2参照)よりもはるかに古い宇宙に存在し、その頃の情報を我々に提供してくれます。

これまでの研究から、我々が現在観測できる宇宙において、(もし存在するのであれば)宇宙紐は概ね数本程度、加えて無数のループ状の紐が存在すると考えられています。紐同士は衝突の度に組み換えが起こり、そこからまたループが誕生するという進化を遂げ、どの時刻で見ても常に長い紐が数本存在するというスケールリング則が成り立っていると考えられています。そして、組み換えやループが崩壊する際には、一般に電磁波、宇宙線、重力波などが放出されます。これまで国内外の様々な研究グループは、宇宙紐が作るネットワーク構造、具体的には宇宙紐全体がスケールリング則に乗るか否かという点に着目した研究を行ってきました(例えば Moore et al., Phys.Rev.D65 (2001) 023503)。しかし、物質場との結合や、それに伴う電磁波放射などまでを考慮した現実的なネットワーク計算を、場の理論的シミュレーションに基づいて行った研究は、これまでほとんど存在していません。さらに言えば、物質場との結合に関係なく、重力波などの周波数や強度と強く関係するループのサイズ自体、それがどのような分布を持って生まれてくるのかが分かっていません。物質場との結合は、逆に宇宙紐のダイナミクス自体にも影響を与え、ある場合においては宇宙紐そのものの存在自体に強い制限が課せられ、それを予言する理論が否定される可能性もあります。

重力波観測が進む昨今、宇宙紐も重要な重力波源の一つとして考えられています。しかし、まだ解明できていない部分が多く、来たるべき重力波宇宙論の時代に向けて、さらなる研究が必要になっています。

## 2. 研究の目的

上で述べた背景に対し、本研究では、物質場および重力場との結合を考慮したスカラー場を用意し、そこから宇宙紐を実際に生成し、そのネットワークの構造を調べます。また、その際に放出される重力波のスペクトルを計算します。

物質場との結合を記述した理論モデルとして、超電導宇宙紐モデルを考えます。これは Witten, Nucl. Phys. B249 (1985) 557 で提唱されたモデルで、物質場としてもう一つのスカラー場を考えます。すると、宇宙紐上をもう一つのスカラー場が流れるようになり、その結果、モデルパラメータによって宇宙紐が安定に存在できる場合とそうでない場合とに分かれます。そして、安定に存在できる場合のパラメータセットを使ってネットワークシミュレーションを行い、そのネットワーク構造の時間進化と、そこから放出される重力波の振幅や波形を正確に予言することを目的とします。日本の重力波干渉計 KAGRA や、将来計画の DECIGO での検出可能性について議論します。

重力波の観測直接観測だけではなく、CMB B-mode 偏光揺らぎの観測からも、宇宙紐の存在を確かめることができます。本研究では、開発中の CMB ボルツマンソルバーに対し、宇宙紐が作り出すベクトル型揺らぎを実装し、そのベクトル型揺らぎが作り出す B-mode 偏光揺らぎの寄与も考慮したパワースペクトル、バイスペクトルの計算を行います。次の10年以内に、CMB B-mode 偏光揺らぎの観測が本格的に開始されます。なかでも、日本の LiteBIRD 計画が順調に進んでおり、本研究では、この LiteBIRD を想定した様々な観測量の理論予言を中心に研究を進めていきます。

また、ここでの重力理論は一般相対性理論を仮定していますが、近年、重力理論の拡張の可能性が盛んに議論されており、それを観測から見出す研究も精力的に進められています。一般相対性理論を超える理論では、一般に重力波の生成や伝搬が、一般相対性理論のそれらから大きくずれる場合があります。そこで、本研究では、重力理論を一般化した場合も考慮し、重力波などを使った宇宙紐の観測にどのような影響を与えるかを考察します。

## 3. 研究の方法

本研究は、場の理論的シミュレーションフレームワーク Freja と CMB ボルツマンソルバー cmb2nd の開発と並行し、これらを実際に用いて、将来の重力波観測および CMB B-mode の観測を想定した各種理論予言を行います。

場の理論的シミュレーションでは、想定する状況に応じて理論モデルを構築し、Freja を利用してコードを生成します。まずは、最も簡単な宇宙紐の理論モデルである Abelian-Higgs モデルを採用します。これは複素スカラー場1つと U(1) ゲージ場を持つモデルです。そして、Moore et al. 等の既存の結果と比較し、コードが正常に動作することを確認します。次に、超電導宇宙紐を記述するため、Abelian-Higgs モデルにもう一つのスカラー場(物質場)を導入します。さらに、重力場として、フリードマン時空からの摂動成分を考え、摂動アインシュタイン方程式を実装します。これによって、宇宙紐ネットワークの形成の際に放出される重力波の計算が可能になります。また、この実装部分は他のモ

デルにも流用することができ、例えば、インフレーションを引き起すインフラトンが作るオシロンと呼ばれるソリトンの形成の際の重力波の計算などが可能です。

CMB ボルツマンソルバー cmb2nd については、すでにスカラーモードとテンソルモードに対するパワースペクトルを計算することは可能になっており、本研究では主にパワースペクトルに関する部分、さらにそれをフィッシャー解析する部分の実装を中心に行います。また、宇宙紐への応用を考えてベクトルモードの実装も行います。これらを用いて、宇宙紐が作る背景重力波によって誘起される CMB B-mode 偏光揺らぎ、およびそれに類似する機構より作られる B-mode 揺らぎの理論予言を行います。さらに、LiteBIRD や、地上の次世代観測計画である CMB-S4 を想定し、実際にこれらの観測計画で、どの程度の物理的情報を抽出できるか、フィッシャー解析を中心とした手法で定量的に評価していきます。

#### 4. 研究成果

論文にまとめたものとして 6 件、現在論文執筆中のものとして 2 件の課題があります。以下で、それぞれについて簡単に説明します。論文番号は、「5. 主な発表論文等」にある論文番号と同じです。

##### (1)【論文 6】有質量重力子による CMB 温度非等方性の非ガウス性

宇宙紐は、非ガウスのなゆらぎを作り出します。したがって、CMB に残る宇宙紐からの影響を観測する場合、始原的な非ガウス性と宇宙紐による非ガウス性を区別する必要があります。その一つの方法が、非ガウス性パラメータ  $f_{NL}$  のスケール依存性です。宇宙紐は、太さやネットワークの相関長といった特徴的なスケールが存在するため、ガウス性もスケールに依存することが予想されます。一方、始原的な非ガウス性は、もし存在するのであれば、これも一般にはスケールに依存しうるものです。そこで、本研究では、始原的揺らぎの持つ非ガウス性がスケール依存する有質量重力子モデルを使って、実際に Planck 衛星で観測されている非ガウス性のスケール依存性を説明しうるかを考えました。

その結果、テンソル揺らぎ(背景重力波)とスカラー揺らぎ(曲率ゆらぎ)の組み合わせで作られる、テンソル・スカラー・スカラー型のパワースペクトルから非ガウス性パラメータを計算すると、それが Planck 衛星で観測されている非ガウス性のスケール依存性を説明しうることを明らかにしました。

##### (2)【論文 5】超伝導宇宙紐の Y-junction のモデル化

2つの超伝導宇宙紐が衝突すると、結合状態を作る場合があります。その結果、その結合した部分からもとの2本の宇宙紐が伸びる形が実現され、その形状からこれを Y-junction と呼びます。Y-junction が安定して存在しうるかは、結合状態の安定性に直結し、さらにはネットワーク構造全体の物理的性質にもおおきく影響します。そこで本研究では、Y-junction を記述する理論モデルの構築を試みました。

宇宙紐を記述する方法としてよく知られている手法は、宇宙紐の太さを無視する近似に基づくもので、Nambu-Goto 紐などと呼ばれています。この Nambu-Goto 紐にもう一つのスカラー場を載せ、Y-junction での境界条件を導出しました。その結果、この単純な拡張では超伝導宇宙紐を記述できないことが明らかになり、こういった他の場と結合した宇宙紐を解析的なモデルとして記述するには、新たなフレームワークが必要であることを示しました。

##### (3)【論文 4】3次ガリレオンモデルの反遮蔽効果

微分結合を含む重力理論の中で、最も簡単な Cubic Galileon モデルを考えます。簡単な拡張であるが故に、一般相対性理論との違いを観測から見出すのもまた難しいモデルとしても知られています。このモデルにはスカラー場も含まれており、重力は通常のテンソル場(時空計量)だけでなく、このスカラー場によっても媒介され、物質の力のバランスや運動の法則に影響を与えます。このスカラー場による力をここではスカラー力と呼びます。Cubic Galileon モデルは、このスカラー力を強重力場中で遮蔽する機構を持っていて、これを Vainshtein 機構と呼びます。本研究では、ブラックホールの降着円盤のような非球対称な物質分布を考え、そういった対称性の悪い状況でも Vainshtein 機構によってスカラー力の遮蔽が実現されるかを調べました。

シミュレーションの結果、降着円盤のような形状の物質分布を考えると、その円盤の穴の部分においてスカラー力が遮蔽されるどころか、逆に増幅されてしまうという現象を発見しました。完全な非線形現象であるため、その物理的な理由を考察するには至っていませんが、Vainshtein 機構は、対称性がある程度高い物質分布など、ある程度整った環境でなければうまく働かないという実例を示しました。また、数値実験の結果、円盤の質量を固定して円盤の内径と外径の比を大きくした場合、および円盤の厚みを薄くした場合ほど増幅効果がより強くなることがわかりました。

Cubic Galileon モデルは、Galileon モデルの中で最も簡単なもので、他にも Quartic/Quintic Galileon モデルが存在します。Quartic/Quintic Galileon モデルは、物質分布の空間対称性が少し崩れただけで大きな非物理的な状況を作り出すため、保守的な立場をとるならば、すでに観測から否定されていると言えます。一方、Cubic Galileon モデルは、物質の分布の対称性がある程度破れていても Vainshtein 機構が働くことが知られています。また、星や銀河を考えると、Vainshtein 機構の働く領域が非常に広く、その内側では常に一般相対性理論が回復してしまうため、スカラー力の直接的な観測からモデルの制限を行うのは困難と考えられています。本研究では、比較的現実的な物質分布の形状として円盤を考えましたが、この場合、スカラー場の非線形性がより悪い方向へ作用するという、これまで知られていない全く新しい現象を示しました。

宇宙の大規模構造ではフィラメント構造やボイドのような構造が存在します。この周囲では、スカラー力の増幅効果を観測することができる可能性があります。また、中性子星連星が衝突した後、遠心力で大きく変形した中性子星が形成される場合がありますが、そのような系も本研究で想定した状況に近い状況となる可能性があります。このように比較的

対称性の低い系に着目することで修正重力理論を制限するという、新しい方向性を示したという意味でも意義深いものがあると考えています。

#### (4)【論文 3】CMB B-mode 偏光の観測に基づいた背景重力波スペクトルの再構成

宇宙紐やインフレーション以外にも背景重力波を生成する機構があり、様々な理論モデルが提唱されています。近い将来の CMB の B-mode 偏光揺らぎの観測で、これらのモデルにどの程度の制限を付けることができるか、という点に着目しました。本研究では一つ一つの理論モデルを取り上げるのではなく、観測されるであろう B-mode の角度パワースペクトルから背景重力波の初期スペクトルを再構成することにし、モデルに依存しない形で背景重力波の検出能力をテストできる方法論を構築しようと考えました。

日本で進められている LiteBIRD 計画での観測を想定してスペクトルの再構成を行いました。その再構成したスペクトルと、ある種の有質量重力子モデルや、SU(2) ゲージ場モデルなどが予言する初期スペクトルとを直接比較することで、これらのモデルへの制限が可能になりました。また、再構成するパワースペクトルのビン数を多くしすぎると、ビン間の相互相関が大きいため大きなエラーが乗ってうまく再構成できなくなることも定量的に示しました。

通常、ある理論モデルがあるとそこで予言される背景重力波の初期スペクトルが与えられ、それを初期条件としてボルツマン方程式を解くことで、観測される B-mode の角度パワースペクトルが得られます。つまり、各モデルごとにボルツマンソルバーを整備し、それを使って方程式を解く必要があります。それを基にして各理論モデルのモデルパラメータへの制限を行うのが通常の方法ですが、モデルが変わるたびにこの工程を繰り返す必要があります。多くのモデルを同時に取り扱うのは困難です。そこで、本研究では、時間を逆行して初期スペクトルそのものを再構成することで、初期時刻での比較が可能になるようにしました。この新しい方法論により、ボルツマン方程式を解くこと無く、観測パラメータ(観測機器のノイズパワースペクトル、CMB レンズ効果の除去の度合い、再構成スペクトルのビン数など)を変えた条件下でのパラメータ推定が可能となりました。

本研究に動機づけされた研究として、Farhang & Sadr [Astrophys. J. 871 (2019) 139] や Campeti et al. [arXiv:1905.08200]があります。これは本研究で行ったフィッシャー解析の手法をさらに進め、フィッシャー行列を対角化することで一種の固有モードを計算し、観測される B-mode のパワースペクトルのどの波数領域が初期パワースペクトルのどの波数領域に強く影響するかを調べたものです(主成分解析)。また、さらなる応用としては、パワースペクトルの再構成が考えられます。様々なインフレーションモデルが考案されていますが、それぞれ違ったパワースペクトルを予言します。また、宇宙紐のように、インフレーション後に作られるパワースペクトルも同様です。パワースペクトルはある程度決まった関数形を持ちます。将来の CMB 観測でその関数形の判別が可能になるかを検証することなどが考えられます。

#### (5)【論文 2】縮退高階微分スカラー・テンソル理論における中性子星解

宇宙紐は重力波観測を通して観測することが可能ですが、一般相対性理論とその他の重力理論とでは重力波の生成の仕方や伝搬の仕方が異なります。そのため、一般相対性理論を拡張した理論での重力場の振る舞いを理解しておく必要があります。近年、スカラー・テンソル理論と呼ばれる種類の重力理論の一般化が盛んに研究されており、その中で最も拡張された理論として縮退高階微分スカラー・テンソル理論(DHOST 理論)があります。本研究では、そういった拡張された重力理論で重力波伝搬と生成を調べるための第一歩として、DHOST 理論で静的球対称解を構築し、DHOST 理論が観測と整合的な理論として成り立つための理論パラメータの範囲を考えました。

DHOST 理論には重力場の他に、スカラー場も含まれます。これらの場の方程式(一般相対性理論のアインシュタイン方程式に対応するもの)を球対称の条件下で書き下し、よく使われる状態方程式を仮定して中性子星解を求めました。その結果、一般相対性理論では考えられないような巨大で超量な中性子星がつくられることが判明し、将来的に電波観測を使った中性子星の直接観測が進むと、こういった巨大な中性子星が存在しない、といったことから DHOST 理論がおおきく制限されることがわかりました。

DHOST 理論はこれまで知られている理論フレームワークの中で最も大きいものであり、殆どの修正重力理論がこの DHOST 理論に含まれます。個々の理論は、DHOST 理論に複数含まれる任意関数同士に一定の関係を付けることで得られます。したがって、DHOST 理論の枠組のままで観測的な制限を与えると、複数の重力理論をまとめて制限することが可能であるため非常に効率的です。また、この重力理論は、重力波の速度が光速からずれたり重力定数が時間変化するなど、それぞれ異なる物理的性質を持っています。そのため、こういった観測手段が理論の制限のために有効かを明らかにできます。本研究では中性子星解に着目しましたが、観測手段としては直接「観て」存在の有無を確かめるという天文学的に極めて直接的で分かり易い方法で重力理論への制限を行うことができることを示しており、将来の中性子星観測への動機づけにもなります。

#### (6)【論文 1】CMB B-mode 偏光の観測を基にした非等方背景重力波の検出可能性

論文4と同様の目的で、本研究では背景重力波の非等方性に着目しました。例えば、SU(2) ゲージ場モデルは、背景重力波の初期スペクトルに 64 重極までの非等方性を予言しており、これが検証可能であれば、背景重力波の生成機構の峻別がさらに行きやすくなります。本研究では、日本の LiteBIRD 計画や、欧米主導で進められている次世代の地上観測計画である CMB-S4 による B-mode の観測を想定して、この非等方性の検出可能性について調べました。

次世代観測器である LiteBIRD の検出感度を想定すると、四重極 ( $g_2 \cos^2 \theta$ ) の検出も困難であることがわかりました。しかし、CMB-S4 世代になると十六重極 ( $g_4 \cos^4 \theta$ ) まで検出の可能性があるとわかり、背景重力波の生成機構に対して、非等方性の観点から初めて制限が行えることがわかりました。また、非等方性がスケールに依存する場合、特に小さいスケールに行くほど振幅が小さくなる(red-tilted)場合は、小スケールでシグナルが得られなくなる

ので非等方性の検出が一層困難になりますが、 $k^{-1}$  程度の依存性までならば CMB-S4 において四重極成分の検出が可能であることを明らかにしました。

初期宇宙で作られる背景重力波として宇宙紐やインフレーション起源のものが考えられますが、仮にインフレーションがスカラー場ではなくベクトル場で引き起こされた場合(ベクトルインフレーション)、その時空の揺らぎとして得られる背景重力波も非等方になります。同様に、宇宙紐からの重力波もある程度の非等方性を持っていることが推測されます。さらに、近年、インフレーションではなくゲージ場を作る重力波が議論されており、これもインフレーションと同じく波数空間で何桁にも渡って平坦なスペクトルを作る代わりに、インフレーションとは異なって大きな非等方性を持ち得ます。このように、背景重力波の起源そのものを峻別するための重要な物理量の一つが非等方パラメータ  $g_i$  であり、一見観測が難しそうないかのような物理量も、これが比較的近い将来の B-mode 観測で検証可能であることを示した点が重要な点です。

今回の解析ではフィッシャー解析を用いましたが、その際、CMB レンズング効果の影響を取り入れていませんでした。また、観測機器のノイズパワースペクトルも、最も単純な白色ノイズであることを仮定しています。これらの過程を外してより現実的な状況設定でのパラメータ推定を行うという方向性がまず第一に考えられます。また、今回の手法をそのまま利用することで、倍スペクトルの非等方性への応用も可能と考えています。なお、その定式化は、すでに Bartolo et al. JCAP 1201 (2012) 029 で与えられています。

#### (7)【論文執筆中】衝突する超伝導宇宙紐の終状態の多様性

超伝導宇宙紐同士を衝突させると、Type-I Abelian Higgs モデルでみられるような結合状態を作る場合があります。もし、結合状態が 100% の確率で作られるのであれば、結果的に形成される宇宙紐ネットワークはスケールリング則に従うことがなく、すぐに宇宙を崩壊させてしまうことになります。そこで、本研究では、様々な角度と速度で超伝導宇宙紐を衝突させる数値実験を行い、どの程度の頻度で結合状態が形成されるのかを議論しました。

まず、超伝導宇宙紐が宇宙紐として存在できるモデルパラメータの範囲を確定させました。その上で、2本の宇宙紐を実際に衝突させるシミュレーションを行い、その終状態として、1) 繋ぎ変えが起こる、2) 結合状態を形成する、3) 二度の繋ぎ変えが起こり互いに通過する、4) 崩壊する、の4つのパターンが存在することを明らかにしました。これを、衝突速度と衝突角度のパラメータ空間における相図としてまとめました。

#### (8)【論文執筆中】様々な宇宙紐からの背景重力波とその峻別の可能性

場の理論で記述される宇宙紐は、最も単純な Abelian-Higgs モデルを始め、様々な理論モデルによって記述されます。これまでに述べてきた超伝導宇宙紐もその一つです。本研究では、将来の背景重力波の観測から、宇宙紐の種類を区別できる可能性について考えました。研究では、Abelian-Higgs モデルと超伝導宇宙紐モデルを使用しました。Abelian-Higgs モデルには、スカラー場とゲージ場それぞれの結合定数 ( $\lambda, e^2$ ) がモデルパラメータとして存在し、その比  $\beta = \lambda / (2e^2)$  の大きさによって Abelian-Higgs 紐の性質が決まります。超伝導宇宙紐については、 $\beta$  パラメータに加え、宇宙紐の上の流れている物質場(を模したスカラー場)と宇宙紐との結合定数  $\beta'$  がモデルパラメータに加わります。この2つのパラメータを様々な値に設定し、それぞれのネットワークシミュレーションを 10 回ずつ行い、その平均をとって背景重力波のスペクトルを作成しました。

シミュレーションの結果、Abelian-Higgs 紐で  $\beta < 1$  の場合は、本来小スケールで振幅が落ちてゆくはずのスペクトルがある程度小スケール側へ伸びていく、特徴的なスペクトルが得られました。このスケールは、相転移のスケールに対応しているため、一般的には非常に高周波の重力波 (MHz~GHz) に当たります。そのため、レーザー干渉計が感度を持つ周波数帯よりもさらに高い周波数に感度を持つ新たな検出方法の開発が必要となります。一方で、超伝導宇宙紐の場合、 $\beta'$  が大きくなる、すなわち物質場と宇宙紐との結合が強くなる場合、背景重力波の全体の振幅が単調に下がることがわかりました。Abelian-Higgs 紐の場合は、振幅と特徴的な周波数とが関連づいていますが、超伝導宇宙紐の場合はこれらを別々に制御することができることとなります。これによって、将来の観測で周波数と振幅とが Abelian-Higgs モデルの予想と大きく離れる場合に、超伝導宇宙紐である可能性が示唆されます。またこれは、宇宙紐が他の物質場と強く結合していることを示しており、CMB の観測などにも影響を与える可能性があります。

#### (9) 本科研費研究全体のまとめ

本科研費研究の期間中、人類は重力波の初検出に成功し、ブラックホールのような強重力場の物理に直接観測の目が届いただけでなく、深宇宙の更に奥の世界へ人間の目が届く時代に入ったと言えます。これにより、インフレーションのような極初期の宇宙を扱う宇宙論分野でも、これまで検証が不可能だったような超高エネルギーの事象も、いよいよ本格的な検証が実現可能になろうとしている段階に入ってきました。次の 10 年の間には、CMB B-mode の観測が本格的に進み、重力波観測も宇宙空間へと進出していきます。これにより、本研究で扱った背景重力波を使った宇宙論『重力波宇宙論』が当たり前のよう議論されていくことになると考えられます。本科研費研究では、宇宙紐に関わる背景重力波に関する研究を、B-mode の観測と背景重力波の直接観測を念頭に置いて遂行してきました。この研究期間を通して、次の 10 年の新しい時代の宇宙観測に対し、宇宙紐という素粒子理論と宇宙論、さらには物性理論の境界を跨ぐ物理をプローブするという新たな動機づけを行うことができました。また、それに伴って宇宙論の精密化がより進むことで、数値シミュレーションを中心に構築する宇宙論である『数値宇宙論』という考え方が更に重要な位置を占めるようになり、本研究がその土台を支えるものになったと確信しています。

## 5. 主な発表論文等

[論文雑誌] (計6件) すべて査読あり

① *Hunting for Statistical Anisotropy in Tensor Modes with B-mode Observations*

Takashi Hiramatsu, Shuichiro Yokoyama, Tomohiro Fujita, Ippei Obata

arXiv:1808.08044, Physical Review D98 (2018) 083522

② *Relativistic stars in degenerate higher-order scalar-tensor theories after GW170817*

Tsutomu Kobayashi, Takashi Hiramatsu

arXiv:1803.10510, Physical Review D97 (2018) 104012

③ *Reconstruction of primordial tensor power spectra from B-mode polarization of the cosmic microwave background*

Takashi Hiramatsu, Eiichiro Komatsu, Masashi Hazumi, Misao Sasaki

arXiv:1803.00176, Physical Review D97 (2018) 123511

④ *Anti-screening of the Galileon force around a disk center hole*

Hiromu Ogawa, Takashi Hiramatsu, Tsutomu Kobayashi

arXiv:1802.04969, Modern Physics Letters A34 (2018) 1950013

⑤ *Y-junction intercommutations of current carrying strings*

D. A. Steer, Marc Lilley, Daisuke Yamauchi, Takashi Hiramatsu

arXiv:1710.07475, Physical Review D97 (2018) 023507

⑥ *CMB scale dependent non-Gaussianity from massive gravity during inflation*

Guillem Domènech, Takashi Hiramatsu, Chunshan Lin, Misao Sasaki, Maresuke Shiraishi, Yi Wang

arXiv:1701.05554, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 1705 (2017) 034

[学会発表] (計 30 件)

英語口頭発表 : 10件

① Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama, “Dynamical screening of scalar waves in Cubic Galileon model”, Essential next steps on gravity and cosmology, 2018

② Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama, “Dynamical screening of scalar waves in Cubic Galileon model”, Gravity and Cosmology 2018, 2018

③ Takashi Hiramatsu, Eiichiro Komatsu, Masashi Hazumi, Misao Sasaki, “Reconstruction of primordial tensor power spectrum from B-mode observations”, Why does the Universe accelerate ?, 2018

④ Takashi Hiramatsu, Daisuke Yamauchi, Daniele Steer, “Field-theoretic simulations of colliding superconducting strings”, CosPa2017, 2017

⑤ Takashi Hiramatsu, Eiichiro Komatsu, Masashi Hazumi, Misao Sasaki, “Reconstruction of primordial tensor power spectrum from B-mode observations”, JGRG27, 2017

(他5件)

英語ポスター発表 : 3件

日本語口頭発表 : 8件

セミナー講演(海外) : 3件

セミナー講演(国内) : 5件

招待講演(日本語) : 1件

[図書] (計 0 件)

[産業財産権] 該当無し

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。