

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800115

研究課題名(和文) 原始背景重力波を通じた超弦理論的重力理論の検証

研究課題名(英文) A study for probing string-inspired gravity with primordial gravitational waves

研究代表者

仙洞田 雄一 (SENDOUDA, Yuuiti)

弘前大学・理工学研究科・助教

研究者番号：80606111

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では初期宇宙のインフレーションに由来する原始背景重力波を通じて超弦理論に示唆される重力理論の妥当性を検証するための基礎的な考察を行った。重力理論のモデルとしてEinstein方程式にBachテンソルと呼ばれるWeyl曲率の補正を与えるEinstein-Weyl型重力理論を仮定し、インフレーション期前後の初期宇宙から現在に至る重力摂動の時間進化を調べた。また、この重力理論における重力波のエネルギー密度の妥当な定義を見出した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we performed fundamental analyses for probing string-inspired gravity using primordial gravitational waves from the early inflationary universe. As a model for gravity, we introduced a Weyl-curvature correction term in the form of the so-called Bach tensor to the Einstein equations. We analysed time evolution of metric perturbations in this theory from around the onset of inflation to the present epoch. We also found an expression for the energy density of gravitational waves appropriate for the considered theory.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙物理 宇宙論 重力理論 重力波 素粒子論 理論天文学

## 1. 研究開始当初の背景

1990年代以降、宇宙マイクロ波背景放射の観測が精密になり、インフレーションと呼ばれる加速的空間膨張が宇宙の最初期に起きたとするインフレーション理論の正しさが、ますます確からしくなってきた。しかし、宇宙マイクロ波背景放射では誕生から40万年を経過した後の宇宙までしか見ることができず、宇宙の創成について確定した結論を出すのは難しい。より初期の宇宙を調べるためには一層透過性の高い信号を用いねばならず、その究極が重力波である。

インフレーション期に空間の量子的揺らぎから宇宙空間全域に生成されたと予想されている重力波を原始背景重力波と呼ぶ。時空の揺らぎである重力波は宇宙を満たす物質との相互干渉をくり抜けて現在の我々に到達してきていると考えられており、インフレーションの直接的探針となる。そして、その検出がなされればインフレーション理論の証明になると考えられている。

原始背景重力波の直接検出を主目的の一つとして、人工衛星型レーザー干渉計の開発計画が欧米や日本で進められている。また、間接的に原始背景重力波の存在を示すために宇宙マイクロ波背景放射のBモード偏光成分を探す計画も世界的に隆盛している。2013年にはその先駆として重力レンズ現象を起源に持つBモード偏光の初検出が報告され、原始背景重力波の誘起する偏光の発見に向けて着実に進展している。

原始背景重力波はインフレーション理論の真偽判定にとどまらず真の物理法則の探査に用いることができる。宇宙の最高エネルギーが実現されていた時期であるインフレーション期の現象には真の物理法則の片鱗が見える可能性が高い。とくに一般相対性理論を修正する重力理論の存在が素粒子の超弦理論によって予言されており、重力法則そのものが支配する原始背景重力波は、そのような真の重力法則にもっとも直接的につながる観測可能量の一つである。原始背景重力波の研究を深めることが、宇宙の観測に基づいて素粒子物理の進展に貢献することにも繋がっている。

## 2. 研究の目的

本研究の主たる目的は、原始背景重力波を通じて超弦理論的な重力法則の類型の一つであるEinstein-Weyl型の修正重力理論の検証を行うことである。この重力理論は一般相対性理論の方程式であるEinstein方程式に対し、Bachテンソルと呼ばれる項の形で時空のWeyl曲率に由来する補正をもたらすものである。

Einstein-Weyl重力理論では、一般相対性理論が予言する零質量の重力子の他に質量を持つ動的な自由度が複数個存在し、それら

の重ね合わせが計量場の揺らぎとなる。従って、Einstein-Weyl重力理論におけるインフレーション由来の原始背景重力波の特性を知るためには、有質量の重力自由度の宇宙初期から現在に至る時間進化について解き明かさねばならない。

このような仮説的な有質量重力自由度の性質は多くが未解明であり、具体的には、物質とどのように相互作用し、装置等による検出が可能になるのか、また波動としてどのような性質のエネルギーを運搬し、たとえば宇宙膨張に影響を及ぼすか否かなどについてはこれまでに統一的な理解が得られているとは言えない。Einstein-Weyl重力理論の観測的検証のためにはそれらを明らかにし、確立することが必要である。

そこで、本計画の策定にあたって次のいくつかの解決すべき理論的課題を設定し、これらに取り組むことを考えた。

(1) 重力の修正がインフレーション期の量子真空状態の決定に与える影響を解明し、量子揺らぎとして生成される原始背景重力波の初期値を得ること

(2) 重力の修正がインフレーション期前後の宇宙膨張則に与える影響を調べ、その背景時空上での重力波の時間発展を理解すること

(3) 重力の修正がインフレーション終了後から現在までの間に重力波をどのように増幅・減衰させるかを解明し、観測可能量への原始背景重力波の反映を知ること

さらに上記の結果を踏まえ、Einstein-Weyl型の修正重力に対する観測的制限の範囲内でどのような性質および量の原始背景重力波が生成され得るかを調べることを目標とした。

## 3. 研究の方法

Einstein-Weyl型の修正重力理論における原始背景重力波の観測理論を確立するために必要な前項の各目標の達成に向けて、いくつかの解析的および数値的な計算を行うことで取り組むこととした。

まず、Einstein-Weyl重力理論におけるインフレーション中の量子状態の考察については、de Sitter背景時空上での重力摂動のテンソル・ベクトル・スカラー部それぞれの運動方程式を解くことでモード関数を求め、それらの短波長極限を調べることで、一般相対性理論における真空と同様の量子状態を選択できるか否かを調べた。また、得られたモード関数に基づいて摂動の正準量子化を試みた。

また、Einstein-Weyl重力理論は量子論的側面ばかりでなく、古典論的な摂動の時間発展にも影響する。特にインフレーションの初期には必ずしも一様等方的でない宇宙膨張の期間があったことが予想され、そのような場合に大きな値を持つWeyl曲率テンソルの

形での補正を受ける Einstein-Weyl 重力理論では一般相対性理論からの大きな乖離、とくに時空の安定性が懸念される。そこで、インフレーション開始期前後の背景重力波の時間進化に対して宇宙膨張の非等方性がもたらす影響について明らかにするために、当初の非等方的な膨張が等方化して指数関数的なインフレーション膨張へと繋がる時空である Kasner-de Sitter 時空を背景として重力摂動の運動方程式の導出に取り組み、また動的自由度の一部について数値的に時間発展を解析することで定量的に調べた。

また、原始背景重力波の観測可能性を探るためにはインフレーションが終了してから現在に至るまでの減速膨張宇宙における波形の進化も知る必要がある。そこで最後に、Einstein-Weyl 重力理論における背景重力波の観測可能量への反映を調べるためにインフレーションから輻射優勢宇宙に接続する重力摂動の解を数値的に探した。

さらに、宇宙膨張に与える影響を理解することへの応用を念頭に置いて、Einstein-Weyl 重力理論での重力波のエネルギー密度を定義することを試みた。

#### 4. 研究成果

(1) Einstein-Weyl 重力でのインフレーション期の量子真空状態の選定法を検討し、空間が一様等方的なインフレーションを考える限りでは、短波長の極限で一般相対性理論における真空に類似した性質の量子状態を真空として選択できることを見出した。さらに、その真空状態でのテンソル摂動およびベクトル摂動の振幅の量子論的な期待値を計算することで、それらのインフレーション起源原始背景重力波としての初期スペクトルを得ることができた。

(2) インフレーション開始時期の特徴に着目するために、Kasner-de Sitter 解を背景として重力摂動の時間進化について考察した。まず、一般相対性理論における厳密解である Kasner-de Sitter 解が Einstein-Weyl 重力理論においても厳密解であることを示した。(同様の事実が、Einstein 空間に分類される一般相対性理論の厳密解全般に当てはまる。これは重力場の方程式に現れる補正項である Bach テンソルが持つ性質によるものである。)このような対称性の低下した背景時空における Einstein-Weyl 重力理論の摂動運動方程式の導出は煩雑を極めるが、Pereira らのゲージ不変摂動論の定式化を援用し、ひとまず形式的ではあるものの、その表式を得ることができた。

(3) 前項のように空間が非等方的に膨張する状況では、重力波は背景の非等方性に依りて角度に依存した強度を持つようになり、ときにその振幅を大きく増幅させることがある。そのことに着目し、Einstein-Weyl 重力理論への応用を見据えた準備的な研究とし

て一般相対性理論の枠内ではあるが Kasner-de Sitter 背景時空での重力摂動の時間進化を数値解析によって調べた。その結果として、まず一般相対性理論においては Kasner-de Sitter 時空は安定であることを強く示唆する結果を得た。従って Kasner-de Sitter 時空は Einstein-Weyl 重力理論での時空の摂動安定性の研究に資することが分かった。さらに、背景時空の非等方膨張を経験する重力波がその波数ベクトルの大きさ・向きにどのように依存して進化するかを詳細に調べることができた。これに基づき、将来的に重力波の広視野観測がなされた際に、その到来角度方向依存性を調べることで初期宇宙での宇宙膨張の非等方性を検知ないし制限できることが分かった。このような重力波強度の非等方性は宇宙マイクロ波背景放射の大スケールでの偏光スペクトルを通じて調べることも可能であり、既存の観測データを用いた制限を得ることができた。

(4) Einstein-Weyl 重力理論の枠内でインフレーションからその後の減速膨張宇宙に接続する背景時空を考え、その上での重力摂動の時間発展を考察した。その際、過去には吟味されていなかった Einstein-Weyl 重力の補正項が支配的となるようなエネルギースケールの低いインフレーションの可能性を考慮し、またインフレーションと輻射優勢宇宙を結ぶ再加熱時における摂動の接続条件を適切に考慮した。重力摂動としてはテンソル摂動とベクトル摂動について調べ、両者が現在の宇宙に至るまで大きな痕跡を残す可能性があることが分かった。

(5) Einstein-Weyl 重力理論における重力波を直接的ないし間接的に観測するための基礎として、重力摂動のうちテンソル摂動とベクトル摂動に対するエネルギー密度の定義についての考察を行った。一般相対性理論では重力波であるテンソル摂動の振幅とエネルギー密度を結びつける公式が存在し、それら二つの物理量がほぼ同一視されるが、Einstein-Weyl 重力を始めとする修正重力理論では、運動方程式が異なるために同じ公式が適用できない。とくに、有質量重力自由度のエネルギー密度については妥当な定義自体が知られていない。そこで、いくつかの手法によって Einstein-Weyl 重力理論の有質量重力自由度のエネルギー密度を定義することを試みた。具体的には、Noether の保存電荷を構成する方法、ハミルトニアンを構成する方法、重力場方程式に計量摂動についての 2 次で現れる反作用項を見る方法である。これら複数の方法によって定義できる量の表式が全微分項を除いて互いに一致することを見出し、かつ平均操作等を行なうことによって全微分項の寄与が消えることが観察されたため、エネルギー密度と捉えるべき物理量の妥当な定義が得られた。これにより、Einstein-Weyl 重力理論における背景重力波の直接観測や、宇宙膨張への影響などを考え

るための基礎的な知見が得られたと考えている。

(6) 以上のように初期宇宙の探針として有用な原始背景重力波に対して、後の時刻になって混入してくる背景重力波の1成分として考えられる、連星ブラックホールが合体する際に放出する重力波について考察した。初期宇宙に起源を持つ原始ブラックホール同士が連星をなし、素粒子的な暗黒物質および星間ガスとの相互作用によって角運動量とエネルギーを急速に失って合体する可能性を指摘した。

#### 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1件)

Kimitake Hayasaki, Keitaro Takahashi, Yuuiti Sendouda, Shigehiro Nagasaki, Rapid Merger of Binary Primordial Black Holes: an Implication for GW150914, Publ. Astron. Soc. Japan, 査読有, 掲載決定済

〔学会発表〕(計3件)

(1) 古谷有, 仙洞田雄一, 新山優樹, Kasner-de Sitter インフレーションでの原始背景重力波: 波数方向に対する強度の依存性, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月21日, 東北学院大学(宮城県・仙台市)

(2) Yu Furuya, Yuki Niiyama, Yuuiti Sendouda, Perturbations of Kasner-de Sitter spacetime, The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 2015年12月7日-11日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市)

(3) 仙洞田雄一, Nathalie Deruelle, 高次曲率重力における重力波のエネルギー密度, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月20日, 佐賀大学(佐賀県・佐賀市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

仙洞田 雄一 (SENDOUDA, Yuuiti)

弘前大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 80606111

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: