

立教大学学術推進特別重点資金 (立教SFR)

大学院学生研究

2018年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院 理学 研究科 物理学 専攻		
研究代表者 (2019年3月現在のものを記入)	在籍課程・学年・学生番号		氏名
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年	彌永 亜矢	印
<input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 1年・18RA002E			
指導教員	所属・職名		氏名
	理学部・准教授		小林 努 印
自然・人文・社会の別	自然	個人・共同の別	共同2名
研究課題	重力波観測を見据えた修正重力理論および初期宇宙モデルに関する理論的研究		
研究組織 (研究代表者・共同研究者) ※2019年3月現在のものを記入	在籍研究科・専攻・課程・学年		氏名
	理学研究科物理学専攻 博士課程後期課程1年		彌永 亜矢
理学研究科物理学専攻 博士課程前期課程2年		富川 慶太郎	
研究期間	2018 年度		
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 300,000円 / (採択金額) 300,000円		

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

近年、重力波干渉計 LIGO によって重力波が初めて直接観測されるなど、重力波天文学が本格化している。これを受け、我々は重力波を用いた修正重力理論および初期宇宙モデルの検証に向けた研究を行った。研究代表者は、修正重力理論について、スカラー・テンソル理論の中でも一般相対論と同じくテンソル型の重力波のみが伝播するようなより一般的な枠組み(EC理論)を構築した。また重力波観測によって、現在の宇宙における重力波の伝播速度はほとんど光速に一致するという厳しい制限が得られている。我々はこの制限を満たすような EC理論のクラスを特定した。共同研究者は、スカラーゆらぎから誘起される重力波のエネルギー密度スペクトルを異なる2つのゲージにおいて求めた。特に放射優勢期で、ピークを持つパワースペクトルのスカラーゆらぎから誘起される重力波についてはゲージによる違いが小さいことを明らかにした。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

{ 宇宙論 } { 相対論 } { 重力波 }

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)**研究代表者の研究：EC理論の構築および宇宙論的性質の解明**

研究代表者は、一般相対論を最小限に修正した重力理論について研究を行なった。一般相対論の持つ物理的な自由度は2である。一方でスカラー・テンソル理論ではスカラー場を導入するため、一般には3自由度を持つ。しかし、一部のスカラー・テンソル理論ではスカラー場を導入しているにも関わらず自由度が2となる理論が存在する。このような理論は、自由度を変えずに一般相対論を修正していることから、一般相対論を「最小限に修正」した理論と解釈できる。この2自由度理論の1つにカスケートン理論がある。これはスカラー場の勾配が時間的である場合に理論の自由度が2となるスカラー・テンソル理論である。研究代表者はこのカスケートン理論を一般的なスカラー・テンソル理論の1種であるGLPV理論の枠組みに拡張した理論(EC理論)を構築し、宇宙論的性質の解明を行なった。

スカラー場の勾配が時間的になる代表的な状況として、宇宙論的な時空が挙げられる。そこで、計算の簡単化のために宇宙論の時空におけるEC理論を考えた。具体的には、平坦な宇宙論の時空においてスカラー場が時間にのみ依存するゲージ(ユニタリゲージ)を採用し、この下で自由度が縮退して2自由度となる条件を求めた。ここで、カスケートン理論では背景場の方程式が変分直後に1階微分方程式となるのに対し、EC理論では変分後に線型結合までした結果が1階微分方程式になることのみを課している。この結果、GLPV理論の6つの任意関数のうち4つについて制限が得られた(制限1)。次に、制限1を満たす理論についてハミルトニアン解析を行い、宇宙論時空だけでなく任意の時空において2自由度となる理論を絞り込んだ。これにより、制限1では制限のついていなかった任意関数についても制限をつけた(制限2)。この制限1,2を満たす理論がEC理論である。ここで、研究代表者は制限1を求めるために平坦な宇宙論の時空を考えた。一方で、曲率の存在する宇宙論の時空を考えると、2自由度になるためには制限2まで満たす必要があることを解明した。

ここで構築したEC理論について、以下のような理論的特徴を見出した。まず、EC理論はホルンデスキー条件を満たさない、すなわちEC理論はGLPV理論に特有の性質を持ち得ることを示した。また、EC理論はスカラー場の勾配が時間的であるという状況のみを考えているため、4次元一般座標不変性を破っている。しかし、研究代表者はこの不変性を復活させ、4次元共変なEC理論の形式を求めることに成功した。さらに、スカラー場の勾配が時間的な状況と空間的な状況においては、伝播するモードの従う方程式が異なることを検証した。具体的には、時間的な場合は方程式がラプラス型になり、境界条件を課すことで2つのモードのみが伝播する。逆に空間的な場合、方程式が双曲型になるために3つ目のモードが伝播し、伝播自由度が3となる。

さらに、2017年に行われた中性子星連星からの重力波観測によって、現在の重力波の伝播速度はほぼ光速であることが判明した。これを受け、重力波の伝播速度が光速と一致するEC理論のサブクラスを特定した。

次に、構築した理論についてより現実に即した観点から議論を行った。初期宇宙における重力場のテンソル型・スカラー型ゆらぎは、現在の宇宙に原始重力波・大規模構造としてそれぞれ痕跡を残しているとされる。これらの重力場のゆらぎに不安定性がないことは、現在の宇宙と矛盾しない必要条件である。そこで、本研究では拡張されたカスケートン理論において宇宙論的摂動を行い、テンソル型・スカラー型ゆらぎの安定性を検証した。なお、より現実に即した議論を行うため、理論に物質場を導入した。

まずテンソル型ゆらぎに関する2次の作用から、テンソル型ゆらぎの安定性条件は拡張されたカスケートン理論に含まれる係数関数どうしの関係式となることを示した。続いて、スカラー型ゆらぎに関する2次の作用を求め、これをフリーエ空間における作用に書き直した。ここで、宇宙時間より短いスケールの波長、つまり短波長極限に注目すれば、揺らぎが安定であるための必要条件を導くことができる。したがって本研究では、作用の形から短波長極限における安定性条件を導いた。

さらに、物質場の密度揺らぎの発展方程式およびポアソン方程式を導いた。そして、これらの式が一般相対論とは異なることを示した。これにより、EC理論は一般相対論と自由度が変わらないにも関わらず一般相対論を修正していることが明確になった。

研究成果の概要 つづき**共同研究者の研究：スカラー型ゆらぎから誘起される重力波のゲージ依存性**

宇宙初期には量子ゆらぎを起源としてスカラー型ゆらぎ(密度ゆらぎ)とテンソル型ゆらぎ(重力波)が生成される。このゆらぎを一様等方時空上の摂動として扱くと、密度ゆらぎは重力不安定性によって増幅し宇宙の大規模構造が形成される。密度ゆらぎは宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の温度ゆらぎの観測から大スケールに関してはスペクトルが判明している。テンソル型ゆらぎも同様に計算することができ、宇宙背景重力波として存在が予言されているが、現時点では検出には至っていない。

また、これとは別に摂動を2次のオーダーまで展開すると1次の密度ゆらぎの二乗を源とした2次のオーダーの重力波が生成されることがわかる。この2次の重力波は密度ゆらぎの情報を含むので、重力波を観測することで密度ゆらぎのスペクトルにこれまででない制限をつけることができる。密度ゆらぎは初期宇宙モデルに依るためスカラー型ゆらぎから誘起される2次の重力波を用いることで、初期宇宙モデルの特定に迫ることができる。

一般に、宇宙論的摂動論を2次のオーダーまで考えると2次の重力波は1次とは異なりゲージ依存性を持つ。しかし、これまでの2次の重力波に関する研究は主に特定のゲージ(Newtonian gauge)でのみ計算されており、他のゲージではあまり議論されていなかった。そこで(J. C. Hwang, et. al 2017)によって初めて2次重力波が異なるゲージ間において計算されたが、結果はゲージによって2次重力波のエネルギー密度が桁で変わるといったものだった。これはゲージごとに異なる観測手段が存在することを示唆しており、このままでは既存の研究結果を持って2次重力波の観測可能性を議論することはできない。(J. C. Hwang, et. al 2017)では物質優勢期を想定し数値計算によって重力波のエネルギー密度が導かれており、何が原因で桁による違いが現れるか定かではなかった。そこで我々はより基礎的な理解を図るため物質優勢期ではなく一般の状態方程式パラメータのもとで、Newtonian gauge とは別のComoving gaugeで計算を行うことで2次の重力波のゲージ依存性を定量的に求めた。この結果、デルタ関数型のピークを持つ原始曲率ゆらぎから誘起される重力波は、放射優勢期においては顕著なゲージ依存性を持たないことが判明した。

研究発表 (研究によって得られた研究成果を発表した①~④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。なお、成果発表を確認できる資料を合わせて提出してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

① 雑誌論文

- [1] 彌永亜矢、高橋一史、小林努 “Extended Cuscuton: formulation,”
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1812, no. 12, 002 (2018)

② 図書 なし

③ シンポジウム・公開講演会等の開催 なし

④(1) 他大学における集中講義・セミナー

- [2] 彌永亜矢 集中講義「スカラー・テンソル理論の一般化、および2自由度スカラー・テンソル理論について」、2019年2月、神戸大学
- [3] 彌永亜矢 セミナー「スカラー・テンソル理論の一般化、および2自由度スカラー・テンソル理論について」、2019年2月、神戸大学

(2) 国際会議・シンポジウム等における発表

- [4] 彌永亜矢、高橋一史、小林努 “Extended Cuscuton,”
15th Marcel Grossmann Meeting(MG15), 2018年7月、(口頭発表・査読あり)
- [5] 彌永亜矢、高橋一史、小林努 “Extended Cuscuton: Formulation and Cosmology,”
International Conference on Modified Gravity (MOGRA2018),
2018年8月、名古屋大学 (口頭発表・査読あり)
- [6] 彌永亜矢、高橋一史、小林努 “Extended Cuscuton: Formulation,”
The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG28),
2018年11月、立教大学 (口頭発表・査読あり)
- [7] 彌永亜矢、高橋一史、小林努 “Scalar-Tensor Theories with 2DOFs, with a Time-like $\partial_\mu\phi$,”
The 2nd Korea-Japan bilateral workshop on String Axion Cosmology,
2019年1月、雲仙福田屋 (長崎県) (口頭発表・査読なし)
- [8] 彌永亜矢、高橋一史、小林努 “Extended Cuscuton,” Accelerating Universe in the Dark,
2019年3月、京都大学基礎物理学研究所 (口頭発表・査読あり)
- [9] 富川慶太郎、小林努 “Gauge dependence of gravitational waves induced by curvature perturbations”,
The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG28),
2018年11月、立教大学 (ポスター発表・査読なし)
- [10] 富川慶太郎、小林努 “Gauge dependence of gravitational waves induced by curvature perturbations”,
The second annual symposium of the innovative area ” Gravitational Wave Physics
and Astronomy: Genesis”
2018年11月、京都大学 (ポスター発表・査読なし)

(3) 国内学会における発表

- [11] 彌永亜矢、高橋一史、小林努 「Extended Cuscuton 理論の構築と応用」、第3回若手による重力・宇宙論研究会、2019年2月、京都大学基礎物理学研究所 (口頭発表・査読あり)
- [12] 彌永亜矢、高橋一史、小林努 「Extended Cuscuton 理論の構築と応用」、
日本物理学会第74回年次大会、2019年3月、九州大学 (口頭発表・査読なし)
- [13] 富川慶太郎、小林努 「スカラー型ゆらぎから誘起される重力波のゲージ依存性」、
観測的宇宙論ワークショップ、2018年11月、山口大学 (口頭発表・査読なし)
- [14] 富川慶太郎、小林努 「スカラー型ゆらぎから誘起される重力波のゲージ依存性」、
日本物理学会第74回年次大会、2019年3月、九州大学 (口頭発表・査読なし)