

立教大学学術推進特別重点資金 (立教 S F R)
大学院学生研究
2019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 (2020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 <input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 2年 (学生番号: 18RA002E)		彌永 亜矢 印
指導教員	所属部局・職		氏名
	理学部・教授		小林 努 印
自然・人文・社会の別	自然	個人・共同の別	個人
研究課題	一般相対論を最小限に修正した重力理論が現在の宇宙を説明する可能性の探究		
研究組織 (研究代表者・共同研究者) ※2020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2年		彌永 亜矢
研究期間	2019 年度		
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 499,801円 / (採択金額) 500,000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。)

現在、重力は一般相対論によって精密に記述されることが分かっている。しかし同時に、宇宙では一般相対論を用いても十分に説明できない現象が観測されている。そこで、一般相対論を包含しながらもより多くの現象を記述できるような新たな重力理論(修正重力理論)を構築する試みが行われている。修正重力理論の中には、理論の自由度を変更することなく一般相対論を拡張するものがある(最小限の修正重力理論)。研究代表者はその1つである EC 理論に注目し、この理論が現在観測されている宇宙の加速膨張を正しく予言し得ることを明らかにした。特に、本研究で扱った EC 理論のサブクラスでは、背景時空の時間発展は標準的な宇宙論モデルである Λ CDM モデルと同様である一方で、物質場の摂動に関しては Λ CDM モデルと異なる振る舞いをみせることを示した。

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。)

{ 相 対 論 } { 修 正 重 力 理 論 } { 宇 宙 論 }

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

背景：最小限の修正重力理論

一般相対論は、現代の標準的な重力理論として広く受け入れられている。その一方で、一般相対論には拡張の可能性も示唆されている。近年、観測によって現在の宇宙が加速膨張していること(宇宙の後期加速膨張)が明らかになった。この加速膨張を一般相対論によって説明するには、理論に宇宙項と呼ばれる定数を導入する必要がある。しかし、観測から導かれる宇宙項の値は理論が予言する値と大きく乖離しており、未だこの問題は解決されていない。そこで、宇宙項を導入する代わりに一般相対論を拡張することで宇宙の後期加速膨張を説明する試み(修正重力理論)が盛んに行われている。

修正重力理論の中で最も基本的なものはスカラー・テンソル理論である。これは、テンソル場で記述される一般相対論に新たにスカラー場を加えた理論の枠組みである。一般的に、スカラー・テンソル理論は理論的制限を満たすように構築された後、観測事実と矛盾しないようにさらに制限される。理論的制限とは、不安定性につながる自由度を持たないことである。この制限により、一般相対論のように本質的にテンソル場のみで記述される理論の自由度は 2 を超えてはならない。一般相対論にスカラー場を 1 つ加えた修正重力理論では、自由度の上限が 3 となる。この制限を満たす一般的な枠組みのスカラー・テンソル理論として、GLPV 理論などがよく調べられている。

上に挙げた一般的なスカラー・テンソル理論は、基本的に 3 自由度理論である。ただし、これらの理論のサブクラスには 2 自由度理論も存在する。この数字は元の理論である一般相対論の持つ自由度の数と一致する。一方で、このような場合でも重力の効果は修正されることが分かっていることから、これらの理論は「一般相対論を最小限に修正した重力理論」と呼ばれる。一般相対論は多くの観測によってその正当性が保証されているため、そこに余計な修正を加えないような重力理論を研究する意義は大きい。

EC 理論は、一般的な 2 自由度スカラー・テンソル理論の 1 つである。この理論は、スカラー場の勾配が時間的な場合にスカラー型の自由度が存在せず、自由度が一般相対論と一致するような理論である。時間的な勾配を持つスカラー場は、例えば宇宙論スケールの現象を記述する有効理論において現れる。したがって、EC 理論は最小限の修正によって構築された宇宙論スケールの有効理論といえる。

研究目的：最小限の修正重力理論を用いた後期宇宙論の解明

EC 理論は構築されて間もないため、解明すべき課題が多くある。特に EC 理論は宇宙論スケールにおける有効理論であるため、この理論が宇宙の後期加速膨張を正しく予言できるかどうかを調べるのは重要である。そこで研究代表者は、EC 理論における現在時刻周辺の背景時空および物質場の摂動的な振る舞いを考え、これまでに得られている観測事実と一致するかを検証した。

研究内容・成果

重力波の観測から、後期宇宙においては重力波の伝播速度が光速とほぼ一致することが分かっている。そこで、この重力波に関する条件を満たす EC 理論全体について後期宇宙論を考えた。この理論において物質場の存在する一様等方背景時空を考え、背景時空が従う方程式、および摂動時空における物質場のポアソン方程式を導出した。また、観測的に制限されている量である実効的なニュートン定数も求めた。

次に、より定量的に議論を進めるため、作用においてリッチスカラーとスカラー場の 2 乗が結合するようなモデルに対し、宇宙の膨張則および実効的なニュートン定数の時間発展を数値的に求めた。結果として、このモデルに含まれる 3 つのパラメータを適当に与えることで後期宇宙が加速膨張することを解明した。特に、このモデルにおける背景時空の膨張則は、一般相対論に宇宙項を加えた Λ CDM モデルと呼ばれるモデルとほとんど一致することを示した。 Λ CDM モデルは宇宙における様々な観測と整合性を持つモデルであり、これと今回扱ったモデルにおける背景時空の時間発展が一致するという事は本モデルの宇宙論としての妥当性を表している。一方で、物質場のゆらぎに関する量である実効ニュートン定数については、今回扱ったモデルと Λ CDM モデルとでは異なることが明らかになった。このことは、2 つのモデルが 1 次の摂動レベルでは判別可能であることを表している。また、現在の実効ニュートン定数の値は月レーザー測距実験によって観測的に制限されている。今回求めた実効ニュートン定数の値は、この制限を満たしていることを確かめた。

研究成果の概要 つづき

※この(様式2)に記入の成果の公表を見合わせる必要がある場合は、その理由及び差し控え期間等を記入した調書(A4縦型横書き1枚・自由様式)を添付すること。

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 なし

(雑誌 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics に投稿中の論文 1 本あり)

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) 国際会議・シンポジウム等における発表

- [1] 彌永亜矢、高橋一史、小林努 “Extended Cuscuton as Dark Energy,”
The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG29),
2019 年 11 月、神戸大学 (口頭発表・査読あり)
- [2] 彌永亜矢、高橋一史、小林努 “Extended Cuscuton as Dark Energy,”
6th Korea-Japan workshop on dark energy at KMI,
2019 年 12 月、名古屋大学 (口頭発表・査読あり)

(2) 国内学会における発表

- [3] 彌永亜矢、高橋一史、小林努 「Extended cuscuton 理論による宇宙の後期加速膨張」、
日本物理学会第 75 回年次大会、2020 年 3 月、名古屋大学 (口頭発表・査読なし、ただし現地開催中止のため講演概要原稿提出をもって発表成立とされた)