

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
2017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 (2018年3月現在のものを記入)	在籍研究科・専攻・学年		氏名		
	理学研究科・物理学専攻・博士課程後期課程2年		小川潤 印		
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	<input type="checkbox"/> 自然	<input type="checkbox"/> 人文	<input type="checkbox"/> 社会	個人・共同の別	個人 <input type="checkbox"/> 共同 <input type="checkbox"/> 2名
研究課題	重力波天文学に向けた初期宇宙と強重力場天体の理論的研究				
研究組織 (研究代表者・共同研究者) ※2018年3月現在のものを記入	在籍研究科・専攻・学年		氏名		
	理学研究科・物理・後期課程2年次		小川潤		
理学研究科・物理・前期課程2年次		赤間進吾			
研究期間	2017年度				
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 499,393円 / (採択金額) 500000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。)

研究代表者は、一般相対論を拡張した重力理論において、重力理論に備わっている Vainshtein 機構と呼ばれる理論に追加された自由度の伝播を局所的に抑制する機構の振る舞いを調べた。その結果、Vainshtein 機構が物質の形状に非常に依存しており、自由度の伝播を抑制するどころか促進してしまう場合があることを見出した。

共同研究者は、曲率入りの宇宙の一般論を研究している。現在の宇宙は空間的にほぼ平坦であることが分かっているが、わずかな空間曲率であればまだ観測的に許されており、また初期宇宙では現在とは異なり閉じた宇宙、もしくは開いた宇宙である可能性もある。そこで本研究では、一様等方時空からの摂動を定式化し、初期宇宙への曲率の影響として、インフレーションにおける揺らぎの振る舞いを調べ、また特異点のない宇宙の安定性の議論を行った。

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。)

[修正重力理論] [宇宙論] [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]

研究代表者は、スカラー・テンソル理論の妥当性を調べることを目的とし、Vainshtein 機構(研究 1)と相対論的星の解の探索(研究 2)について研究を行った。

研究 1) Anti-screening of the Galileon force around a disk center hole

一般相対論にスカラー場を追加したスカラー・テンソル理論では、重力のほかにスカラー力がはたらくため、一般相対論からの差異が生じる。そのためスカラー・テンソル理論は Vainshtein 機構と呼ばれるスカラー力を抑制する機構を備えている必要がある。この Vainshtein 機構のはたらきは、物質の分布の対称性が高い場合でしか調べられておらず、現実的な系でははたらきは調べられていなかった。

そこで本研究では、物質が円盤状に分布し、さらに中心部分をくり抜いた系での Vainshtein 機構のはたらきを調べた。このような物質の系はブラックホールの降着円盤などに見られる。この物質の系の周りでスカラー場の運動方程式を数値的に解き、Vainshtein 機構のはたらきを調べることで、天文学的な観測にも影響を与えるかを精査した。

研究代表者は、次の3つの主な結果を導いた。

1. 円盤の空洞付近で、Vainshtein 機構がスカラー力を促進するようにはたらく
2. スカラー力の促進は、時空の曲がり方には依存せず、物質の形状に強く依存する
3. スカラー力の促進は、円盤が薄く、穴の大きさが円盤に対して十分小さく、さらに円盤の質量が小さいときに、より顕著となる

以上のことから、Vainshtein 機構のはたらきは、全く自明ではないことを見出した。

2) ガリレオン場と中性子星

中性子星由来の重力波が検出されつつあり、今後の観測精度の向上により中性子星の質量-半径関係や星内部の超高密度物質の状態方程式がわかることが期待されている。高々2次の相互作用項を持つガリレオン理論は、宇宙論的スケールと太陽系スケールでのテストをパスできるが、中性子星などの天体の解を構築できるかはまだよくわかっていない。このようなガリレオン理論において、中性子星の構造について理論的に研究し、今後の重力波観測との比較検討を行う基盤を構築することを目的とし研究を行っている。ガリレオン理論において、漸近的ド・ジッター解が存在することが数値的に示されており、この解を外部解として持つ星の解を構築している。

研究成果の概要 つづき

[共同研究者]

1. 曲率入りの宇宙における揺らぎの定式化

現在の宇宙は観測からほぼ平坦であることが分かっており、また初期宇宙を扱う際にも、代表的なシナリオであるインフレーションを考える際には急激な加速膨張で曲率の影響は一瞬で薄まることから、主に平坦であるとして研究されている。

しかし、もし有限の空間曲率が存在すれば宇宙論解や背景時空からの揺らぎは、たとえ少なくともその影響は必ず受ける。そこでまず、初期宇宙の具体的なシナリオにおける曲率の寄与を調べるために、背景時空(一様等方時空)からの摂動の定式化を行った。具体的には、曲率入りの宇宙において、運動方程式が高階微分を含み、かつオストログラドスキー不安定性を回避するような包括的な理論に基づき、その作用を背景時空からのスカラー型摂動とテンソル型摂動の2次まで展開した。ここで得られた結果を応用することで、個々のシナリオにおける曲率の影響を調べることができる。

2. 特異点のない宇宙禁止定理の拡張

初期宇宙のシナリオの一つとして、バウンスやジェネシスに代表される特異点のない宇宙と呼ばれるシナリオがある。このシナリオは初期特異点と呼ばれる宇宙初期のエネルギー密度などの発散する点を回避できるものの、これらを記述する宇宙論解の不安定性が問題となっている。

先行研究により、場の運動方程式が2階に従うスカラー・テンソル理論において、特異点のない宇宙を記述する宇宙論解はモデルによらず全て不安定性であることが知られている(特異点のない宇宙禁止定理)。この定理の条件として、背景時空が空間的平坦かつ一様等方であることが課されていたが、上述の通りわずかであれば有限の空間曲率は観測的に許されている。そこで本研究では前者の条件を緩め、曲率入りかつ一様等方であるとした場合に特異点のない宇宙禁止定理が成立するのかどうかを検証した。

結果として、負の空間曲率が存在する場合には、先行研究と同様に特異点のない宇宙禁止定理が成立することを証明し、また正の空間曲率が存在する場合には一般に定理は成立せず、正の空間曲率が安定な宇宙論解を構築するための必要条件の一つであることを証明した。

3. 曲率入りの宇宙における揺らぎの振る舞い

定式化した内容をインフレーションへと応用し、曲率入りの宇宙で曲率揺らぎと重力波のスペクトルを導出することで、曲率の寄与が観測的に捉えられるかどうかを議論した。この時、揺らぎの典型的な振る舞いを調べるために2次の作用に含まれる、スカラー場とその運動項を含む任意関数が時間的にほぼ一定とみなせるという仮定をした。結果として、まず曲率揺らぎに関してはモデル依存性が強く個別のモデルに限定する必要があるが、重力波に関しては、2階微分に従う単一スカラー・テンソル理論において理論依存性を持たず、またインフレーションモデルへの依存性も持たない一定の寄与を与えることを証明した。またその寄与は現在の観測精度では区別できないと考えられる。

研究発表 (研究によって得られた研究経過・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。)

- 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 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)

○Hiromu Ogawa, Takashi Hiramatsu, Tsutomu Kobayashi ``Anti-Screening of Galileon force around a disk with a hole," arXiv:1802.04969, (査読中)

④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

国際会議における発表

○Hiromu Ogawa, Teruaki Suyama, Tsutomu Kobayashi ``Instability of hairy black holes in shift-symmetric scalar-tensor theories,"『Collaborative Conference on Gravitational Wave』, Jeju, Korea, May 2017.(招待講演)

○Hiromu Ogawa, Takashi Hiramatsu, Tsutomu Kobayashi ``Anti-screening of the Galileon force around a disk centre hole."『Gravity beyond Einstein: Quo vadimus?,』, Edinburgh, Scotland, Jan 2018.

○Shingo Akama ``The effect of the spatial curvature in the early universe in the Horndeski theory and beyond Horndeski theory," 『The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan(JGRG27)』, Higashi Hiroshima Arts and Culture Hall Kurara, Hiroshima, November 2017.

○Shingo Akama ``Generalized multi-Galileons, covariantized new terms, and the no-go theorem for non-singular cosmologies," 『21st annual International Conference on Particle Physics and Cosmology』, Paris Diderot University, Paris, August 2017

国内会議における発表

○赤間進吾、小林努 ``The effect of the spatial curvature in the early universe in the Horndeski theory and beyond Horndeski theory,"『第73回日本物理学会年次会』, 22pK406-10, 東京理科大学, 2018年3月.

○赤間進吾 ``Generalized multi-Galileons, covariantized new terms, and the no-go theorem for non-singular cosmologies," 『第74回天文・天体物理若手夏の学校』, ホテル圓山荘, 長野県, 2017年7月.

セミナーにおける発表

○Hiromu Ogawa, Takashi Hiramatsu, Tsutomu Kobayashi ``Anti-Screening of Galileon force around a disk with a hole," Laboratoire de Physique Theorique, Orsay, France, Jan 2018.

○Hiromu Ogawa, Takashi Hiramatsu, Tsutomu Kobayashi ``Anti-Screening of Galileon force around a disk with a hole," ICG, Portsmouth, England, Jan 2018.