

## 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

## 2020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 (2021年3月現在 のものを記入)	在籍課程・学年・学生番号	氏名	
	<input checked="" type="checkbox"/> 博士前期課程 2年 <input type="checkbox"/> 博士後期課程 年 (学生番号: 19LA004E )	池田 拓人 印	
指導教員	所属部局・職	氏名	
	理学部物理学科・教授	小林 努 印	
自然・人文・社会の別	<input type="checkbox"/> 自然 ・ 人文 ・ 社会	個人・共同の別	<input type="checkbox"/> 個人 ・ 共同 名
研究課題	計量アフィン幾何学に基づく新たな修正重力理論とその妥当性の多角的検討		
研究組織 (研究代表者・共同研究者) ※2021年3月現在のものを記入	在籍研究科・専攻・課程・学年	氏名	
	<u>研究代表者</u> 理学研究科物理学専攻 博士課程前期課程2年	池田 拓人	
研究期間	2020 年度		
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 250,000円 / (採択金額) 250,000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。)

Ia型超新星の観測を契機にして、現在の宇宙全体の加速膨張が観測的に示唆されており、近年では CMB の観測などもこれを裏付けている。このような現在の宇宙の加速膨張を引き起こす機構のことをダークエネルギーと言うが、その実態は謎に包まれている。標準的な理解は、宇宙項やスカラー場により加速膨張を説明するモデルである。本研究では、スカラー場からなるダークエネルギーが物質と非最小結合している場合について、球対称時空にスカラー場がどのような影響を与えるかの研究を行った。その結果、静的球対称な星周辺で  $k$ -エッセンスは自明な配位をとることを示し、またモデルのパラメータに対して観測的制限を与えることにも成功した。

## 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。)

[修正重力理論] [ダークエネルギー] [宇宙物理学]

**研究成果の概要** (図・グラフ等は使用しないこと。)研究の背景

現在の宇宙は加速膨張(後期加速膨張)をしているというのが現代物理の標準的な理解であり、近年の実験観測もこれを裏付けている。このように宇宙の加速膨張を引き起こす機構のことをダークエネルギーというが、一般相対論でこのような加速膨張を説明するには、作用に宇宙項(宇宙定数)と呼ばれる定数を加える必要がある。これは宇宙全体の斥力としてはたらくため、加速膨張を引き起こすことができるのだが、観測から得られる宇宙項の値は、理論的に予言されるものに比べてきわめて小さいなどの問題があり、これは現在にいたっても解決はされていない。そこで、宇宙項を一般化したダークエネルギーモデルの研究も盛んに行われている。例えば、宇宙に存在するスカラー場が加速膨張を引き起こすモデルが代表的である。特に、スカラー場のポテンシャルエネルギーが加速膨張を引き起こすものをクインテッセンスといい、スカラー場の運動エネルギーによって加速膨張を引き起こすものをk-エッセンスという。このようなスカラー場が物質とどのような結合をしているのかは全くもって不明のままであって、理論の構築や検証は不十分なのが現状である。

また、一般相対論を修正した重力理論を修正重力理論というが、ブラックホールまわりなどの強重力場での修正重力理論の検証が広く行われている。修正重力理論の代表例として、スカラー場によって重力を修正するスカラー・テンソル理論があるが、このスカラー・テンソル理論において星の周辺でスカラー場が非自明な配位を取るとは一般には困難であるとされている。例えば、運動方程式が二階となる最も一般的なスカラーテンソル理論であるホルデスキ理論のうち、シフト対称性を持っているような理論のあるサブクラスに対しては、静的球対称なブラックホールはスカラー場の非自明な配位を持っていないという、ブラックホール周りについてのある種の無毛定理が知られている。なお、これを破るような解についての研究もなされており、例えば、ブラックホール周りでスカラー場が非自明な配位を持つ解として、スカラー場の Ansatz を動径座標にのみ依存した静的なものだけでなく、時間にも線型依存したものを仮定するモデルがある。ここでシフト対称性により、理論はスカラー場に微分を通してしか依存していないため、このような時間に線型依存した静的でないスカラー場を仮定した場合でも時空は静的なままである。

研究目的

このような背景から、物質とスカラー場が非最小結合している場合に球対称解の解析をすることは、理論的な興味だけでなく、現時点では未だ完全な理解には至っていない宇宙の加速膨張の起源を探るという観点や、主にスカラーテンソル理論などに対する重力理論の検証などの面からも興味深い研究対象になっている。

ここで、スカラー場と非最小結合した物質の球対称解に関する先行研究として、微分依存しない disformal 結合した物質に対する解析がある。しかし、これはスカラー場と物質の結合が微分に依存していないため、シフト対称性との相性が悪くダークエネルギーなどのシフト対称性を持っているとされているスカラー場に対して、物質との結合が変化する影響を見るには不向きなモデルである。

そこで本研究では、物質がシフト対称なスカラー場と微分依存した disformal 結合している場合について、球対称解の解析を行い、どのようなスカラー場の配位が実現されるのかを精査した。

## 研究成果の概要 (つづき)

## 研究内容

まず、静的球対称な時空を考え、シフト対称なスカラー場の Ansatz として、時間線型依存した静的ではないスカラー場の配位を仮定する。このようなスカラー場と非最小結合している物質を考えるのだが、具体的な結合の形としては、スカラー場の一階微分までを含む最も一般的な計量の変換である disformal 変換を施された計量(disformal 計量)を通して、計量とスカラー場の両方に結合しているような物質 (disformal 結合した物質) を考える。

このように物質がスカラー場と非最小結合しているときには、計量と物質の結合の帰結として計量のソース項に対応するエネルギー運動量テンソルが存在するほかに、スカラー場と物質の結合の帰結としてスカラー場のソース項に対応するスカラー量 (以下ではこれをスカラー場のエネルギー運動量テンソルと呼称する) が存在する。このスカラー場のエネルギー運動量テンソルは、特に物質との結合が disformal 結合で記述される場合には計量のエネルギー運動量テンソルで書き表されることが知られている。これはスカラー場のエネルギー運動量テンソルと計量のエネルギー運動量テンソルの成分とが独立でなく、それぞれを好き勝手な配位に選ぶことはできないことを意味している。特に、disformal 結合した物質を含む系で接続条件を議論する際などには、計量のエネルギー運動量テンソルとスカラー場のエネルギー運動量テンソルとが独立でないために、取り扱いには注意を要する。

さらに、スカラー場がシフト対称性を有している場合には、前述のスカラー場のエネルギー運動量テンソルは、計量のエネルギー運動量テンソルを含む全微分の形で書き表せる。

このように球対称な星の周辺にスカラー場が存在するとき、時空が静的であるためにはスカラー場の降着を打ち消すような物質のエネルギーの流れ(熱流束)が必要である。これはエネルギー運動量テンソルにおける非対角成分として現れ、より具体的には(tr)成分を考慮したことに相当する。また、このような設定のもとでは、一般に動径方向の圧力と角度方向の圧力が一致しないような非等方の圧力分布になることもあり得るため、これら二つの効果を考慮し、理想流体にこれらの寄与を加えた物質分布を考えて解析を行った。

一般相対論に k-エッセンスを加えたダークエネルギーモデルに対して物質分布が存在する星の内部で、スカラー場を解析すると、大きく分けてその解には二つのブランチが存在することがわかる。ここで片方はスカラー場が自明な配位になるブランチであるから、以降では他方を非自明なブランチと呼称する。この非自明なブランチで星の中心でのふるまいを解析すると、スカラー場の境界条件をどのように選んでも非自明なブランチは解として実現できないことが判明した。これを無理やり解として採用するためには、スカラー場の時間依存性を決める定数項を星ごとに調整する必要がある。これは例えば、ある特定の質量、半径等の星に対してのみ成り立つものであるから、この宇宙にある全ての星がその特定のある同じ質量などを持っていない限りは、一般の状況下では成り立たない。

同様の解析を星の外部でも行うと、外部解もスカラー場の自明な配位を導くブランチと、非自明なブランチとの二種類が存在することが示されるが、これは星の内外的接続条件を考慮することで星の表面での境界条件が定まるから、これに沿うように解のブランチを選ぶためには、スカラー場が自明な配位を取る必要があることがわかる。つまり、これによってシフト対称なダークエネルギーモデルに対し、星周辺でスカラー場が自明な配位しか取らないという、ある種の無毛定理を示せたことになる。さらに、こうして星周辺でのスカラー場の配位を厳密に求めることができたため、理論モデルのパラメータの観測的制限についても議論が可能である。例えば、理論モデルが LIGO による重力波検出と無矛盾であるためには、disformal 結合における disformal 因子のとりうる値などに制限がかかる。

なお、既存のスカラー・テンソル理論における無毛定理についての先行研究は、シフト対称なスカラー場の Ansatz として動径座標にのみ依存したようなモデルで解析をしており、スカラー場が時間に線型依存したモデルの解析は行われていない。むしろ、このような時間に線型依存したスカラー場の配位というものは、無毛定理を破り、スカラー場の球対称解を得るために使われることが多い。そのため、このように時間に線型依存したスカラー場の配位をとってもなお、スカラー場の配位に対して大きな制限を与えるということが判明したのは、ダークエネルギーに対する理解を加速させるだけでなく、単純に理論的な観点から見ても大変興味深い。

**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 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)

該当なし

②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)

該当なし

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)

該当なし

④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

(1) 国際会議における発表

- [1] Tact Ikeda, Tsutomu Kobayashi, Aya Iyonaga,  
“Static stars with heat flux vector in Horndeski/DHOST theories,”  
ONLINE JGRG WORKSHOP 2020,  
(2020年11月、オンライン開催)

(2) 国内会議における発表

- [1] 池田拓人、小林努、彌永亜矢、  
“Static stars with heat flux vector in Horndeski/DHOST theories,”  
第33回 理論懇シンポジウム、  
(2020年12月、オンライン開催)
- [2] 池田拓人、小林努、彌永亜矢、  
「シフト対称性を持つスカラー場と非最小結合した星について」、  
日本物理学会 第76回年次大会、  
(2021年3月、オンライン開催)