

立教大学学術推進特別重点資金(立教SFR)
大学院学生研究
2022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 (2023年3月現在のものを記入)	在籍課程・学年	氏名	
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年 <input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 1年	村田 知瞭	
指導教員	所属部局・職名	氏名	
	理学部・教授	小林 努	
自然・人文・社会の別	<input checked="" type="radio"/> 自然・ <input type="radio"/> 人文・ <input type="radio"/> 社会	個人・共同の別	<input checked="" type="radio"/> 個人・ <input type="radio"/> 共同名
研究課題	SU(N)ゲージ場を用いたインフレーションモデルの観測的制限		
研究組織 (研究代表者・共同研究者) ※2023年3月現在のものを記入	在籍研究科・専攻・課程・学年	氏名	
	研究代表者 理学研究科物理学専攻 博士課程後期課程 1年	村田 知瞭	
研究期間	2022 年度		
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 399,388円 / (採択金額) 400,000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。)

インフレーションとは、ビッグバンの前にあったとされる急激な加速膨張のことである。この機構により、宇宙が一様等方かつ平坦という状況を自然に作り出すことができ、標準ビッグバン理論の初期条件に関する問題を解決することができる。これまでの観測結果からインフレーションがあったことはほぼ確実視されているが、具体的なモデルの特定には至っておらず、現在も様々なインフレーションモデルが研究されている。本研究では素粒子物理学から動機付けられたSU(N)ナチュラルモデルを用いて、非等方な初期条件に対する振る舞いを研究した。その結果、このモデルは非等方な初期条件から始めても等方な解に収束していくことが確かめられた。

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] [インフレーション] [場の理論]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

研究背景：インフレーション理論

標準ビッグバン理論は、宇宙が高温高密度の状態から始まったとする初期宇宙の理論である。この理論は宇宙マイクロ波背景放射や軽元素合成などの観測結果を非常に良く説明でき、現在では標準的な理論として受け入れられている。一方で、標準ビッグバン理論は、宇宙が一様等方かつ平坦という不自然に調整された初期条件から始まったことを予言する。

この不自然さを解決する方法として、インフレーション理論が提唱されている。インフレーションとは、ビッグバンの前にあったとされる急激な加速膨張のことである。この機構により、宇宙が一様等方かつ平坦という状況を自然に作り出すことができ、標準ビッグバン理論の初期条件に関する問題を解決することができる。

インフレーションを起こすモデルは、基本的にスカラー場やベクトル場を重力理論に加えることで作ることができる。これまでの観測結果からインフレーションがあったことはほぼ確実視されているが、具体的なモデルの特定には至っておらず、現在も様々なインフレーションモデルが研究されている。

その中でも、SU(2)ゲージ場とスカラー場が Chern-Simons 項を通じて相互作用する、axion-SU(2)モデルが盛んに研究されている。Axion-SU(2)モデルは素粒子物理学の観点から考案されたモデルで、将来の観測で検証可能な原始重力波を生成することから注目されている。

一方で、弦理論などの高エネルギーの理論から、力を媒介する粒子として、より一般に SU(N)ゲージ場が現れる可能性が示唆されている。したがって、初期宇宙という高エネルギーな現象を扱う上では、SU(N)ゲージ場が重要な役割を果たすと考えられる。このことを踏まえて、SU(2)ゲージ場を SU(N)ゲージ場に一般化させた、SU(N)ナチュラルモデル[T. Fujita, et al.(2021)]が考案された。このモデルは SU(N)に含まれる SU(2)部分群の埋め込み方によって、ゲージ場の振幅やエネルギー密度などの物理量に影響が現れる、という特徴がある。

研究内容、研究成果

空間の非等方性は、基本的にインフレーションによって等方化されるが、初期に非等方なゲージ場が存在する場合、等方化されない可能性があることが知られている。このように等方化されない場合、標準ビッグバン理論の初期条件に関する問題を解決できたことにはならない。そこで、本研究では非等方な SU(N)ゲージ場が存在する場合にも等方化されるのかを調べた。ここでは SU(N)ゲージ場を用いたモデルとして SU(N)ナチュラルモデルを用いた。このモデルの N=2 の場合である axion-SU(2)モデルでは、昨年出版した論文[I. Wolfson, A. Maleknejad, T. Murata, E. Komatsu and T. Kobayashi, JCAP 09 (2021) 031] で既に調べてあるので、ここでは N>2 かつ軸対称のケースを調べた。本研究ではまず、軸対称な SU(N)ゲージ場の配位を見つける方法について議論した。そして、計量の非等方性は SU(N)ゲージ場の各空間方向のノルムから決まり、配位に依らないことを示した。さらに各空間方向のノルムが一致する時、計量が等方化されることも示した。

また、先行研究においても、適当なゲージ場の初期条件から等方な SU(2)部分群が構成されることを調べていた。しかし、その時は背景がドジッター時空で、インフレーションを起こすインフラトン場からの結合は一定であると仮定して数値計算されていた。本研究ではこの点を改善し、軸対称な背景時空の下でアインシュタイン方程式、インフラトン場とゲージ場の運動方程式全てが整合的であるように解き直した。その結果、SU(3)の場合で数値計算したところ、背景時空とゲージ場のどちらも等方化されることを確かめられた。

このモデルは SU(N)が SU(2)部分群を成すことにより等方な解を得ることができる。この時、SU(2)部分群の埋め込み方によって、ゲージ場の振幅やエネルギー密度などの物理量に変化するという特徴がある。先行研究[T. Fujita, et al.(2022)] の段階では、SU(2)部分群の組み方が時間変化(遷移)するような解は見つかなかったため、遷移が起こらないことを前提に線形摂動を計算していた。その結果として、遷移を起こさない場合には、axion-SU(2)モデルの場合と線形摂動の範囲で区別がつかなくなるということが指摘されていた。このことは、インフレーションを起こすモデルが実質的に特定できないことを意味する。しかし、申請者らの研究で、SU(2)部分群が遷移する可能性があるということを軸対称な SU(3)ゲージ場のもとで示した。この遷移は SU(N)ナチュラルモデル特有のシグナルであり、将来的に、axion-SU(2)モデルと区別できる可能性を示唆している。

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研究成果報告書提出フォームより提出してください (紙媒体等、研究成果報告書提出フォームから提出できない場合は、別途リサーチ・イニシアティブセンターへ提出してください)。

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)

※修士論文・博士論文は含みません。

①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)

- [1] Tomoaki Murata, Tomohiro Fujita and Tsutomu Kobayashi
 “How does SU(N)-natural inflation isotropize the Universe?”
 Phys. Rev. D **107** (2023) 4, 043508

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] Tomoaki Murata, Tomohiro Fujita and Tsutomu Kobayashi
 “SU(N)-natural inflation in axisymmetric background”
 JGRG31,
 (2022 年 10 月、東京大学 小柴ホール)
- [2] Tomoaki Murata, Tomohiro Fujita and Tsutomu Kobayashi
 “SU(N)-natural inflation in axisymmetric background”
 Korea-Japan Workshop on Dark Energy,
 (2022 年 11 月、オンライン開催)

(2) 国内会議における発表

- [1] 村田知瞭、藤田智弘、小林努、
 “SU(N)-natural inflation in axisymmetric background”
 Observational Cosmology Summer Workshop in 2022,
 (2022 年 8 月、舞阪協働センター、招待講師)
- [2] Tomoaki Murata, Tomohiro Fujita and Tsutomu Kobayashi
 “SU(N)-natural inflation in axisymmetric background”
 Early Universe Mini-workshop,
 (2023 年 1 月、理化学研究所 神戸キャンパス)