

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009-2011

課題番号：21540278

研究課題名（和文） 高次元ゲージ理論に基づいたインフレーション模型

研究課題名（英文） Model for inflation based on higher-dimensional gauge theory

研究代表者 稲見武夫

(INAMI TAKEO)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：20012487

研究成果の概要（和文）：

高次元ゲージ理論には余剰次元成分からのスカラー場が含まれている。宇宙のインフレーションはこのスカラー場に由来するという新しい考え方を提唱し、5次元ゲージ理論の  $S^1$  コンパクト化を用いてインフラトンの新しい模型を作った。模型のパラメータは少ないが、密度（温度）揺らぎを含めて天体観測データをうまく説明出来、インフラトン・ポテンシャルの fine tuning 問題が解決されている。未だ発表から日が浅く、評価は定まっていないが、将来的に影響が出ると期待している。

上の考え方を高次元重力に拡張するのが自然である。高次元重力に含まれるスカラー場は radion とよばれる。5次元重力理論の radion に基づいたインフラトンの模型を作った。この模型で精密な天体観測が再現できるかも調べた。

研究成果の概要（英文）：

We have constructed new models for cosmological inflation and density perturbation based on gauge theory in higher dimensions. They reproduce astrophysical data naturally by choosing a small number of parameters, solving the fine-tuning problem in the inflaton potential. Extending this idea to higher-dimensional gravity we have constructed an inflation model by identifying the radion with inflaton. .

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
平成 22 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
平成 23 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：物質系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理学

キーワード：素粒子（理論）

## 1. 研究開始当初の背景

“ゲージ階層性”問題（fine-tuning問題）は素粒子の統一理論を作る上で長年の懸案である。この問題は対称性の破れを担うヒッグス

場の起源に由来している。その解決に向けてテクニカラー模型、超対称性などが提案され、素粒子物理の内容が豊富になり、統一理論の大きな発展へとつながった。10数年前に稲見

と林(りん)はそれらに代わって、高次元ゲージ理論がヒッグス場と対称性の破れの起源であるという考えを提唱した。この考えはゲージ・ヒッグス統一モデルとよばれ、その研究が世界的に始まった。

一方、天体物理ではビッグバン宇宙論における宇宙の地平線問題、平坦性問題などのパズルが知られている。80年代初めに初期宇宙のインフレーションが提唱され、この困難は一举に解決されるだろうと期待された(佐藤, Guth)。その後Lindeなどにより、新インフレーション、カオティック、2成分の模型など、インフレーション理論の研究で大きな発展があった。宇宙インフレーションを担うスカラー場がインフラトンである。

近年、精密な天体観測が進んで、インフラトン・ポテンシャルが持つべき望ましい性質が分かった。それにつれて、インフラトン・ポテンシャルにもゲージ階層性と類似なパラメーターのfine tuningという困難があることが分かって来た。その意味で過去のインフレーションモデルはどれもこの困難を抱えている。過去のモデルを超えて、インフラトンの新しいモデルを作る事が素粒子物理と宇宙論にまたがる中心テーマになっている。

素粒子物理のヒッグスと宇宙物理のインフラトンという2種類のスカラー場は、何らかの意味で関連しているのではないかという疑問が湧いて来る。両者を同時に扱う理論の枠組みが有って欲しい。さらに、同じ視点から弦の場の理論、ブレーンに基づいたインフラトンの研究へも進みたいと考えた。

## 2. 研究の目的

これまで別々に考えられて来た、2つのスカラー場、ヒッグスとインフラトンの起源を探り、素粒子と宇宙の2つのfine tuning問題が高次元ゲージ理論で同時に解決される仕組みを研究する。

具体的には、高次元ゲージ理論でスカラー場のone-loop有効ポテンシャルを求め、インフラトンのポテンシャルがslow-rollの性質を持つかどうか調べる。さらに、この模型がtoy模型を越えて、精密な天体観測データ(e-folding, spectral indices, 密度(温度)揺らぎなど)を再現出来るか調べる。

弦理論、ブレーンの理論は高次元ゲージ理論を含んでいる。この視点から広く弦理論、ブレーン理論に基づいて、ヒッグスとインフ

ラトンの両方の起源を明らかにする。高次元ゲージ理論を弦理論の観点から見直すと、弦の場の理論における弦のone-loop有効ポテンシャルを求めるという新しい問題に行き着く。この未開拓な問題にも答えを出したい。

素粒子物理学では、ゲージ階層性問題、超弦理論などに関連して、超対称性が大きな役割を担っていると考えられている。宇宙インフレーションでも超対称性が何らかの役割を果たしているのではないかと、という疑問に答えたい。

## 3. 研究の方法

稲見(研究代表者)は過去にゲージ理論、重力理論における量子補正のいろいろな面の研究に携わって来た。特に、高次元ゲージ理論、高次元重力理論の研究では、有限な量子補正に意味を与える重要な結果を得た。今回のヒッグスとインフラトンの研究はこれらの研究に着想を得ている。これらの素粒子論の研究で学んだ方法と考え方、得られた結果が今回の宇宙論の研究で活かされる。

稲見は宇宙論の研究を始めて日は浅いが、これらの素粒子物理の結果と経験を活かして、宇宙論研究にゲージ場・重力場の量子補正を取り入れ、新しい見方と方法を切り開きたい。

向山氏(研究分担者)は宇宙論屋であるが、アインシュタイン重力理論を越える重力理論を積極的に研究してきた。特に、弦理論、ブレーンを取り入れた宇宙論の研究で世界をリードする結果を導いている。林(りん)氏(連携研究者)は高次元ゲージ理論の新しい面での研究で世界をリードしている。稲見・林(りん)と向山は、これまで素粒子と宇宙という研究方法に違いが有ったが、ヒッグスとインフラトンの起源に対する興味を共有していて、両者の研究協力は役に立つ。研究分野の違う3人の研究協力から新しい研究結果が期待できる。稲見と向山、稲見と林はお互いの研究所を訪ね、研究会を通じても、頻繁に研究連絡を行う。

## 4. 研究成果

### まとめ

初年度(2009年度)から予定した研究がスムーズに進んだ。高次元ゲージ理論という観点に基づいて、インフレーションに対する新しい考え方を提唱し、インフレーションと密度揺らぎに対する模型を作ることが出来た。toy模型を越えて、この模型で精密な天体観測が再現できるかも調べた。

2年目後半から3年目にわたって、インフ

レーション, 重力理論に関連して新しい問題を着想し, 研究を始めている. (下記の項目4)~6))

1) 高次元ゲージ理論の中で最も簡単な, 5次元ゲージ理論の $S^1$ コンパクト化の模型を考えた. インフラトン・ポテンシャルは5次元ゲージ場によるone-loop輻射補正から現れる. 超対称な5次元ゲージ理論を考えて, インフラトン・ポテンシャルを求め, インフラトンのtoy模型を作った.

これらの結果をWMAPなどの天体観測データと比較して, 我々のインフラトン模型のパラメータの値を決め, 模型の妥当性を調べた. toy模型を越える一歩である.

インフレーション模型のfine tuning問題の解決を目指すという研究目的が達成された. さらに, 模型のパラメータの選び方などから, 超対称性とその破れの利点を示した. 2) 最近の天体観測で宇宙の微小な温度揺らぎが精密に求まっている. 理論的には, 宇宙のインフレーションと並んで宇宙の密度揺らぎの原因が何か, さらにその大きさの説明が大事な問題である. この観点から, Lythなどにより, インフラトンとは別にカーバトン

(curvaton)というスカラー場が導入された. 高次元ゲージ理論の観点からは, curvatonを高次元ゲージ場に取り込むのが自然である. 6次元ゲージ理論に基づいてそのような模型を作り, インフラトン・カーバトンポテンシャルを計算出来た.

この研究で密度揺らぎの研究に新しい見方を与えた. 我々の詳しい解析から, curvatonからの揺らぎへの寄与はインフラトンに比べて小さいという結果が得られた. Lyth氏などの以前の研究とは異なる重要な結果である.

1)と2)は研究結果を論文として発表済み. 発表後日が浅く, 未だ評価は出ていない. 将来的には影響が出て来ると期待している. 3) 最近, アインシュタイン重力理論を越えて, Horavaによって繰り込み可能な(今の段階では仮定)重力の新しい理論(Horava-Lifshitz (HL)重力)が提唱された. 紫外領域でアインシュタイン理論を修正するという考え方に立つ. この理論をインフレーションと暗黒物質へ応用した. 平行してこの2つの問題に対するゴースト模型の研究を先に進めた. どちらも向山氏(分担者)が主として研究したが, 稲見と学生も同じ理論に関連した研究を始めた.

2010年度~11年度

4) 高次元ゲージ理論に基づいたインフラト

ン模型の研究を發展させて行くうちに, 高次元重力場に含まれるスカラー場もインフレーションで役割を果たすのではないかという疑問を抱いた. 次の新しい研究を行った. (現在論文作成中. 口頭発表有り)

高次元重力理論にもスカラー場が含まれていて, radionとよばれる. 最も簡単な5次元重力理論の $S^1$ コンパクト化の模型を考えて, radionをインフラトンと見なす模型を初めて提案した. 5次元重力とフェルミオンの理論で, 重力とフェルミオンのone-loop補正から radion のポテンシャルが得られる. パラメータを適当に選んで, radionポテンシャルはslow rollというインフレーションの望ましい性質を持つことが分かった. 天体観測データとの比較も行い, よい一致が得られた.

5) 上で, 高次元ゲージ理論からのインフラトンと高次元重力理論からのインフラトンを別々に研究した. 両方のスカラー場が共存する状況が起こり得る. その意味で, ゲージ理論と重力の両方を取り入れた高次元理論で, インフレーション模型を研究する価値がある. ヒッグスと radion が競合することになる. さらに, この模型ではハイブリッド模型が実現されている可能性が有る. 素粒子の模型でハイブリッド・インフレーションを実現する初めての模型になるかも知れない. 現在これらの研究を続けている.

6) 宇宙インフレーションでは真空エネルギーは正の値で, 宇宙項 $\Lambda$ に等しい. この場合時空間はド・ジッター空間になる. 現在の $\Lambda$ の観測値が桁外れに小さいのは何故かという疑問は理論物理の大問題である(宇宙項問題). 最近になって, 宇宙項の計算の枠組みが初めて見えて来た. このような状況で, ド・ジッター空間上の場の量子論の研究にとりかかった. 以下のような宇宙項の赤外遮蔽機構に関する研究を進めている.

i) 重力ループによる宇宙項への輻射補正.  
ii) toy模型として低次元場の理論を考えて, n点関数へのループ補正.

iii) 宇宙項への非摂動効果, 具体的にはド・ジッター空間上のインスタントン解を足し上げる.

続行中の研究で, 学会発表は有る.

7) その他に, 宇宙のインフレーション, 暗黒物質, ブラックホールに関する研究で, 幾つかの結果を得た. 主に向山が研究. 稲見と学生も研究中.

i) インフレーション中の軽い場の効果の解析.

ii) Gradient expansionを用いた宇宙論的非線形摂動の解析.

iii) ブラックホールに関する余剰次元の効果.

iv) 新しい量子重力理論 (Horava-Lifshitz 理論) に基づく宇宙論.

v) ゴースト凝縮に基づく宇宙論、等についての研究をおこなった.

iv) の HL 重力理論はその量子論的な内容がよく理解できていない. 特に HL 理論の要である繰り込み可能性の仮定が未だ証明されていない. 稲見と学生はこの問題に答えを出すべく, HR 理論の量子論を作る研究を行っている.

8) 見方を全く変えると, 余剰次元が自発的に生成される可能性はないだろうか, という疑問が湧いて来る. ある種の 4 次元のゲージ理論では余剰次元が自発的に生成され, fuzzy torus になることを示した. ヒッグス場に関わる fine tuning も自然に解決されている. 余剰次元の fuzzyness が CP の破れを伴うという面白い結果が得られた. その現象論的な帰結と宇宙論的な意味合いを調べることは意味が有るだろう.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 23 件) 全て査読有り

- ① T. Inami, Y. Koyama, C.S. Lim, S. Minakami, “Higgs-Inflaton Potential in Higher-Dimensional SUSY Gauge Theories”, Prog. Theor. Phys. 122 (2009) 543. 査読有り
- ② K. Furuuchi, T. Inami, K. Okuyama, “Gauge-Higgs unification in spontaneously created fuzzy extra dimensions”, JHEP, 11 (2011) 006. 査読有り
- ③ S. Mukohyama, “Horava-Lifshitz Cosmology: A Review”, Class. Quant. Grav. 27 (2010) 223101. 査読有り

[学会発表] (計 41 件)

- ① S. Mukohyama, “Cosmological implications of gravity at a Lifshitz point”, COSMO/CosPA2010, Tokyo U, 2010.09.30
- ② 稲見武夫, 小山陽次, 水上史絵 “Inflaton and Curvaton from Higher-Dimensional Gauge Theories”, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 23 日, 岡山大学
- ③ T. Inami, “Fine-Tuning Problem(s) in Gauge Theory/Inflation”, 5th Crete Regional Meeting in String Theory, Crete, Greece, July 5, 2009.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等 無し

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者: 稲見武夫

(INAMI TAKEO)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号: 20012487

(2) 研究分担者: 向山信治

(MUKOHYAMA SHINNJI)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・准教授

研究者番号: 40396809

(3) 連携研究者: 林(りん) 青司

(LIM CHONG-SA )

神戸大学大学院・理学研究科・教授

研究者番号: 80201870