

Exploring Higher-Dimensional Gauge Theory: A Model of Early Dark Energy and A Non-Abelian Gauge Theory with Magnetic Flux Background

大久保, 勇利

<https://hdl.handle.net/2324/7182295>

出版情報 : Kyushu University, 2023, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 : 大久保 勇利

論文名 : Exploring Higher-Dimensional Gauge Theory: A Model of Early Dark Energy and A Non-Abelian Gauge Theory with Magnetic Flux Background
(高次元ゲージ理論の探究: Early Dark Energy の模型と背景磁場を伴う非可換ゲージ理論)

区 分 : 甲

論文内容の要旨

素粒子物理学の現時点での到達点である素粒子標準模型はゲージ理論という理論的枠組みによって記述され、様々な観測結果を非常に高い精度で説明する。一方で、標準模型では説明できない現象が存在することも知られている。例えば、ニュートリノの質量や暗黒物質・ダークエネルギーなど観測的に存在が確かめられているものの説明がなされていない要素や、重力の量子化やゲージ群の起源、階層性問題といった理論的な問題などが挙げられる。これらの未解決問題の解消に向けて、大統一理論や超弦理論、ゲージ・ヒッグス統合理論など、標準模型を超える理論が様々なアプローチで議論されており、それらの多くが高次元時空上に定義された理論である。このように高次元理論は標準模型を超える理論の有力な候補である。

本研究では高次元理論の中でも特にコンパクトな余剰次元を伴う高次元時空上に定義されたゲージ理論を取り上げる。高次元ゲージ理論では時空次元の増加に伴ってゲージ場の成分が増加し、余剰次元成分は 4 次元有効理論にスカラー場を生じる。この余剰次元スカラーの性質はゲージ対称性によって制限されており、その結果として質量への量子補正が有限になるなどの性質がある。このスカラーをヒッグスと同定し、階層性問題の解決を目指すのがゲージ・ヒッグス統合理論である。また、このスカラー場をインフレーションや現在のダークエネルギーの起源となるような宇宙論的なスカラー場とみなす研究も行われており、高次元ゲージ理論に含まれるゲージ場の余剰次元成分によって標準模型を超える物理を自然に説明できるかもしれない。本論文では高次元ゲージ理論の宇宙論への応用と背景磁場を伴う高次元非可換ゲージ理論の構築という 2 つの研究を論じる。

まず、宇宙論への応用として高次元ゲージ理論による Early Dark Energy (EDE) の実現を議論する。近年の宇宙論的観測において、現在の宇宙の膨張率を表すハッブル定数の値が、宇宙の距離梯子を用いた局所的な観測と、初期宇宙からの光である宇宙マイクロ波背景放射 (CMB; Cosmic Microwave Background radiation) との間で大きく食い違っていることが報告されている。CMB の観測からハッブル定数を決定する際には標準的な宇宙モデルである Λ CDM モデルを仮定しており、ハッブル定数の不一致は Λ CDM モデルに修正を要する可能性を示唆している。不一致の解消に向けて様々な可能性が検討されており、その有力な候補の一つが EDE である。宇宙の晴れ上がりの少し前のある時刻まで通常のダークエネルギーのように振る舞い、その後エネルギー密度が素早く減衰する EDE の存在によって、CMB の観測から得られるハッブル定数の値が大きくなり、局所的な観測から得られる値に近づく。

EDE は理論的には適切なポテンシャルを持ったスカラー場により説明することが可能である。本

研究ではこの EDE スカラーの起源を高次元ゲージ理論の観点から検討した．最も簡単な高次元ゲージ理論である 5 次元 $U(1)$ 理論に着目し，そこに含まれる余剰次元スカラー場による EDE の説明を試みた．5 次元のゲージ対称性は余剰次元スカラーに対するポテンシャルが古典レベルで存在することを禁止するが，量子効果によって有効ポテンシャルが生成する．理論に含まれる物質場の電荷やバルク質量などのパラメーターを適切に選ぶことで，この有効ポテンシャルが EDE を実現するために必要なポテンシャルの形状やスケールを持ち得ることを示した．さらに，この系の状態方程式やエネルギー密度の時間発展を数値的に解析し，実際に EDE 的な振る舞いが実現されることを明らかにした．

次に，本論文で取り扱う 2 つ目のテーマはトーラス状にコンパクト化された余剰次元空間に背景磁場を伴う 6 次元非可換ゲージ理論の構成である．余剰次元における背景磁場の存在はトーラス上のシフト対称性を破り，余剰次元スカラー場がその自発的対称性に伴う南部ゴールドストーンボソンとなった結果，このスカラーの質量への量子補正が 1-loop レベルで完全に相殺されるということが， $U(1)$ や $SU(2)$ などの理論において確かめられている．このような性質は余剰次元スカラーをヒッグス場とみなすゲージ・ヒッグス統合理論のモデル構築に有用であり，従って背景磁場を伴う高次元ゲージ理論の性質は現象論的に魅力的な研究対象である．

本研究ではゲージ・ヒッグス統合理論や大統一理論への応用を視野に入れ，先行研究で仮定されていた $U(1)$ や $SU(2)$ などのゲージ群を一般の $SU(n)$ に拡張し，4 次元有効理論の質量スペクトルを計算した．また，ゲージ群だけではなく，背景場に関しても理論と整合的な一般のものを仮定しており，さらにゲージ固定項に関しても一般の R_ξ ゲージを用いた上で，ゲージパラメーターを固定せずに残している．この解析の結果，一部の先行研究で指摘されていたタキオンモードが，ゲージ群が $SU(n)$ ($n \geq 2$)の場合に，背景場やゲージの取り方によらず存在することを示した．またタキオンを安定化する機構や対称性の破れなどについても議論した．