

【学位論文審査の要旨】

1. 研究の目的

初期宇宙のインフレーションや現在の宇宙のダークエネルギー及びダークマターの起源は、現代宇宙論および素粒子物理学の未解決問題である。そしてこれらの解決は宇宙の始まりやその後の進化を理解する鍵となっている。最初期（インフレーション期とそれに続く再加熱期）の宇宙については、そのエネルギースケールが 10^9GeV 以上であり電弱スケール (10^2GeV) を超えているため、重力を含むような、素粒子の標準模型 (SM) を超えた物理学が必要である。

超対称性 (SUSY) および超重力は SM を超えた物理学を記述する最も有望な候補である。したがって、超重力理論を用いて、ダークエネルギー、ダークマター、そして宇宙論的インフレーションを研究するのは自然である。現象論的な要請から、ダークマターの候補やド・ジッター真空 (正の宇宙定数)、インフレーション後の SUSY の破れが必要であることを超重力理論に基づくインフレーションの研究は示している。プランク (衛星ミッション) コラボレーションによる宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測や大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) によるヒッグス質量の実験データ収集の近年の進歩は、最初期の宇宙に関する実験と理論の突き合わせを可能にしており、精密宇宙論の急速な進展に寄与している。そのような中で、CMB データと非常によく合致している最も成功したインフレーションモデルの一つとして、スタロビンスキーモデル (1980) が注目されている。

一方で、インフレーション物理学の成功は、宇宙論的モデルを、SM で記述される電弱スケールの低エネルギー素粒子物理学および大統一理論 (GUT) で記述されるインフレーションスケールの高エネルギー素粒子物理学と繋ぐ新しいパラダイムを生む。ここでは特に、物質を含む量子重力理論の有力候補とされる超弦理論をカラビ・ヤウ多様体上にコンパクト化した際の有効理論として現れる、超重力と結合した超対称性 GUT (SGUT) の研究の進展が大いに期待される。

超重力理論においてインフレーションモデルを構築する分野では、多くの場合、有質量スカラー超多重項に (インフラトンと呼ばれる) インフレーションを起こすスカラー場が含まれるという仮定に拠っている。この場合、インフラトンの超対称性パートナーであるスカラー粒子の存在とその安定化の問題、および η 問題と呼ばれる、インフレーションに適したスローロール型のインフラトンポテンシャルを得ることが一般には困難であるという問題が立ちはだかる。これらの問題を避けるために、ただ一つのスカラー粒子を持つ有質量ベクトル超多重項にインフラトンを割り当てる方法が提案されている。しかしこの方法 (の最小限の実現) は、インフレーション後に SUSY の回復を引き起こし、そのため素粒子の現象論及び宇宙の再加熱と整合しないことが知られている。申請者の博士論文は、ポロニーモデルに従うスカラー (物質) 超多重項を加えることにより、これらの問題を解決しつつ超重力理論におけるインフレーションにアプローチする新たな拡張を与えるものである。

2. 研究の方法と結果

この博士論文の理論研究では、曲がった超空間による超重力理論の定式化を採用し、これを用いてゲージ対称性の自発的破れのヒッグス機構を記述している。曲がった超空間では超対称性が明白に表されており、超重力と物質の間のしばしば複雑で非自明となる (最小限ではない) 結合を、一般的かつ明示的に記述して研究を行うことが可能となる。また、

超重力に適合したヒッグス機構は、ベクトルボゾンやグラビティーノといった関連する場に質量を与え、超重力理論のゲージ対称性や超対称性を自発的に破るのに用いられる。これらの方法は超重力理論の理論的研究において一般に確立されている。

この博士論文では、超重力理論における宇宙論的インフレーションおよびインフレーション後の SUSY の自発的破れを同時に実現するべく、これらを統一的に取り扱う。申請者はこのような目的のため、1980 年に A・ヴァン・プロエイエンによって初めて提唱された、ベクトル多重項と超重力との間の最小限ではない結合に注目した。この最小限でない結合は、インフレーション、特にスタロビンスキーインフレーションを記述するよう選択できる (任意の) 実関数 J で表わされる。この方法は、2013 年に何人かの研究者により、超重力理論においてスカラーゆらぎスペクトルの冪の任意の理論値を与えることができるようなインフレーションの記述に用いられた。しかしインフレーション後の SUSY 回復の問題は残ったままであった。

申請者の博士論文における主な成果は(i)有質量ベクトル超多重項およびカイラル(スカラー)超多重項を含む超重力理論の構築、および(ii)超重力理論においてインフレーション後の SUSY の自発的破れを持つスタロビンスキーインフレーションを理論的に記述するために導入された、一つのカイラル超場 (J .ポロニー、1977) を持つポロニー・スタロビンスキー (PS) 超重力という特定のモデルの提唱、にある。この博士論文で計算された一般的なスカラーポテンシャルは、3 つの任意関数 (K, W, J) を用いているという意味で、E.クレンマーら (1979) の有名な結果の拡張となっている。PS 超重力の場合、得られたスカラーポテンシャルは、初期宇宙のインフレーションのみならず、その後の宇宙のミンコフスキー真空における SUSY および R 対称性の自発的破れと、そこで実現される任意値のグラビティーノ質量とを合わせて記述するのに用いられる。ダークエネルギーの実現を念頭に、これに正の宇宙定数 (ド・ジッター真空) を与えた際の真空の安定性を確認することもまた本論文でなされている。

次に、提唱された超重力理論はヒッグス超場を導入することにより超重力と結合した $U(1)$ 超対称ゲージ理論として再定式化される。ヒッグス超場のユニタリーゲージ固定は同じ理論を与えるが、この新しいゲージ不変な形式はここで提唱された PS 超重力を、ゲージ群が $U(1)$ 因子を持つような超対称大統一理論へ埋め込むのに適している。

最後に、この論文は、ポロニースカラーとインフラトンの混合による、ここで提唱されたインフレーションモデル (PS 超重力) の不定性の解析を含んでいる。そしてその不定性は、R 対称性のゲージ化を伴わないフェイエット・イリオポルロス (FI) 項による PS 超重力の元々の作用の変形によって除去される。これは、知られてはいるもののその物理的な特性がまだ明らかではない、他の非線形項による FI 項を伴う PS 超重力の作用の非常に非自明な拡張を要請する。

3. 審査の結果

超重力理論におけるインフレーションモデルの研究は、理論宇宙物理学および高エネルギー理論物理学における現代的な研究において競争的な分野となっている。申請者の博士論文における研究はインフレーションと SUSY の破れの統合的な記述に向けられており、これらは超重力理論の宇宙論および素粒子物理学への現象論的応用において特に重要となるものである。本論文で提唱された新たな (拡張) 超重力理論の枠組みは、このような研究において大変有用となる意義深いものであり、同研究分野に新たな方向性をもたらしている。

本論文は主に PS 超重力と呼ばれる新たなインフレーションモデルの構築と、そのスカラーポテンシャルの計算、そしてその解析に向けられている。これらの新規な成果の導出は系統的で完全なものである。本論文は同時に、超対称大統一理論および超弦理論と、ここで提唱されたインフレーションモデルの興味深い接点を示唆するものであるが、その詳細については触れられていない。この点は本論文の科学的価値を貶めるものではなく、また主な結果に影響するものでもない。より深い研究のよい始点となるものである。

PS 超重力によるインフレーションモデルは、提案された枠組みにおけるスタロビンスキーインフレーションの不安定性を除去するのに必要な FI 項の導入により更に拡張される。本論文で提唱された、インフレーションの PS 超重力モデルおよび SUSY の破れの現象論的応用については、重いグラビティノーダークマターによる宇宙論シナリオの理論的実現に同モデルを採用した他の研究者（アツダツィら、2017）によって既になされている。

S.ケトフとの共同研究に基づく申請者による科学的成果は超重力理論分野に重要な寄与を果たした、オリジナルかつ新規なものである。本研究における申請者の寄与は本質的なものであり、その成果は、SUSY の破れ、ダークマター、そして宇宙論的インフレーションの超重力理論に基づく記述に新たな方向性を与えるものである。本博士論文の成果は、超重力理論におけるインフレーションモデルの構築、および SM を超えた素粒子論および宇宙論へのその現象論的応用など、さらなる研究に向けた道具立ておよび基礎を与えている。

以上により、本博士論文は博士（理学）の学位に十分値するものと判定した。

4. 最終試験の結果

本学の学位規定に従って試験および試問を行った。公開の席上で論文内容の発表を行い、物理学専攻教員による質疑応答をもって試験とした。また、論文審査委員による本論文および関連分野の試問を行った。その結果、専門科目および外国語について十分な学力を持つものと認め合格と判定した。