

氏 名	瀬 戸 おさむ
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2596 号
学位授与の日付	平 成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Evolution of the universe in higher-dimensional theories (高次元理論に基づく宇宙進化の研究)

論文調査委員 (主 査) 教 授 小 玉 英 雄 教 授 中 村 卓 史 教 授 川 合 光

論 文 内 容 の 要 旨

現代宇宙論の課題は、誕生に始まり現在に至る宇宙進化の全過程を物理学の基本法則に基づいて解明することにある。この課題の中で、特に宇宙の初期進化の研究は、現在の宇宙に存在する物質の起源や豊かな階層構造の起源を明らかにし、その後の進化の初期条件を決定する上で重要である。この宇宙初期進化の研究には、超高エネルギー現象を支配する基礎法則の知識が不可欠となるが、近年この基礎法則に関する研究には飛躍的な進展があった。特に、低エネルギー現象における4つの基本相互作用である電・弱・強及び重力相互作用を統一的に記述する理論の最有力候補と考えられている超弦理論・M理論は、局所的に時空が10次元ないし11次元であることを予言しており、宇宙の初期進化の描像に大きな変更を迫っている。

高次元統一理論に基づいて宇宙模型を作る上でまず問題となるのは、高次元の理論から4次元の理論を導く方法である。古くからあるひとつの方法は、低エネルギーの世界では時空がサイズの小さい高次元空間とサイズの大きい4次元時空の積となっているとするものである。この方法は余剰次元のコンパクト化、対応する模型はKaluza-Klein模型と呼ばれる。もう一つはRandallとSundrumにより最近提唱されたもので、高次元時空が境界のある5次元時空にコンパクト化され、我々はその4次元境界(ブレーン)に局在化しているとするブレーンワールド模型である。この模型は11次元時空を基礎とするM理論から自然な帰結として得られるもので、現在活発に研究されている。

このような背景のもとで、申請論文では、高次元統一理論が観測と整合的な宇宙進化のシナリオを与えるかという観点から、Kaluza-Klein模型およびブレーンワールド模型を用いて、宇宙進化のダイナミクス、大域的ゆらぎの振る舞い、物質の起源の問題が考察されている。

申請論文は、内容的に2つの部分からなる。まず、第1部では、ブレーンワールド模型における宇宙の大域的ゆらぎに関して申請者が行った研究がまとめられている。宇宙論的なスケールのゆらぎのふるまいを調べる際には、ゆらぎの相対論的な記述が必要である。その際、一般相対論的な摂動論において摂動変数の中に物理的な意味を持たない座標変換のゲージ自由度が含まれていることが重要な問題となる。従来の4次元理論では、このゲージ自由度を取り除く方法として、ゲージ依存性を持たない変数(ゲージ不変量)を抽出し、このゲージ不変量のみを用いてゆらぎの方程式を記述する定式化が広く用いられ成功している。第1部の前半では、このゲージ不変な定式化の高次元理論への拡張が行われている。まず、高次元時空における重力場の摂動を記述するゲージ不変量が構成され、その従う方程式系が導びかれている。さらに、時空の幾何学量とその中の特異超曲面上の幾何学量との関係を一般に与えたIsraelの方法を適用することにより、我々の住む4次元超曲面上の量を高次元時空の計量の摂動量により表す関係式が導かれている。また、Randall-Sundrum模型では、高次元時空の摂動量の従う発展方程式がひとつのマスター変数に対する波動方程式に帰着されることが示されている。

第1部の後半では、この高次元ゲージ不変摂動論をHorava-Witten理論に基づく動的な宇宙モデルに適用することにより、テンソル型摂動の進化とその反作用が考察されている。それまでのブレーンワールド模型における時空計量の摂動に関する研究では、ミンコフスキー時空やド・ジッター時空といった最大の対称性を持つ背景時空に考察が限定されていたが、

ここでは時空の対称性が低く現在の宇宙と同様の巾的な膨張をする背景時空に対して重力波を表すゆらぎの解析解が求められ、その振る舞いおよび背景時空への反作用が二次摂動論を用いて評価されている。さらに、これらの解析に基づいて、ブレインワールド宇宙模型の背景時空解の中に摂動の反作用に対して不安定なものがあること、また解が高次元の意味で安定であっても、余次元方向に非一様な摂動成分がブレイン上の4次元宇宙の進化に大きな影響を及ぼすことが示されている。この結果に基づいて、整合的なブレインワールド模型の構築には、高次元時空のゆらぎが生み出す非線形効果の解析が不可欠であることが結論されている。

高次元理論のコンパクト化では、コンパクト化された余剰次元の体積や幾何構造の自由度を記述するモジュライが4次元時空の場として振る舞い、宇宙進化に大きな影響を及ぼす。申請論文の第2部では、このモジュライ場の存在に起因する宇宙論的諸問題が議論され、それらの問題を回避した首尾一貫した宇宙進化のシナリオの可能性が検討されている。モジュライ場には様々なものが存在するが、申請論文ではそれらの中で、多くの高次元統一理論に共通に現れるディラトンに着目し、その期待値の安定化の問題が詳しく考察されている。ディラトン期待値の安定化は、我々が現在観測している低エネルギーでの物理現象を高次元時空上で定式化された理論で説明する為には不可欠であるが、それは同時に新たな問題を引き起こす。特に、安定化に伴いディラトン場は有限な期待値の周りで振動を起こすが、この振動は有限な質量をもつ粒子の集合と同等で、それらの粒子は有限な時間で高エネルギーの通常物質に崩壊する。この崩壊は大量のエントロピーを生成し、現在観測される軽元素の存在量を宇宙初期元素合成により説明することを困難にする。本論文では、弦理論において超対称性を破る機構として有望視されているゲージノ凝縮によりディラトンのポテンシャルが生み出されるモデルに基づいて、この困難を回避する可能性が分析されている。ディラトンの安定化に関しては、宇宙膨張がディラトン運動の減速を生み出すことに着目した Barreiro らのアイデアが用いられている。結果として、これらのディラトン安定化機構が軽元素の存在量についての観測と整合的であるには、バリオン荷を持ったスカラー場の凝縮により宇宙のバリオン-反バリオン非対称性が生み出されることが必要であることが結論されている。

論文審査の結果の要旨

初期宇宙の研究は、素粒子の統一理論の登場により急速に発展した。中でも、1980年代に提案されたインフレーション宇宙モデルは、それまでの単純なビッグバンモデルでは説明できなかった宇宙の一樣等方性や大域的な構造の起源を明らかにし、空間の平坦性や初期ゆらぎのスペクトルに関するその予言は最近の宇宙背景輻射非等方性の観測により強く支持されている。しかし、今後宇宙の観測情報がますます精密で豊かになることが予想される中で、現在のインフレーションモデルは現象論的モデルの色彩が強く、これら精緻な観測情報を定量的に説明できる段階にはない。今後の観測の進展に対応するには、高エネルギー領域における十分信頼できる基礎法則に基づいて初期宇宙モデルを構成することが不可欠である。

申請論文は、この問題意識を背景として、近年急速に発展しつつある重力を含む統一理論である摂動論的超弦理論およびその非摂動的統一理論である M 理論に基づいて宇宙の初期進化を研究したものである。これらの統一理論の最大の特徴は、高エネルギー領域では時空が4次元でなく10次元ないし11次元という高次元となることを要求していることである。当然、低エネルギーで観測される時空は4次元なので、これらの理論では高次元時空が低エネルギーで4次元に見える機構が必要となる。この機構として現在、2つの方法が提案されている。その一つは、余剰次元がすべて小さくコンパクト化されるとする Kaluza-Klein モデルである。もう一つは、我々の世界が高次元時空（バルク時空）の境界上に局在化していて、その境界（ブレイン）がコンパクト化により4次元となっているとするブレインワールドモデルである。これら2つの4次元化機構は共に余剰次元をコンパクト化する点では共通するが、Kaluza-Klein モデルでは従来の4次元宇宙モデルと類似の宇宙描像が得られるのに対して、ブレインワールドモデルは宇宙の時空構造に関して従来のものと大きく異なる描像を与える。このため、申請論文では、ブレインワールドモデルに特有の問題と余剰次元のコンパクト化が共通に生み出す問題が個別に議論されている。

まず、ブレインワールドモデルに関する部分では、宇宙の大域的ゆらぎの問題が主に取り扱われている。ブレインワールドモデルでは通常物質が4次元境界に局在化しているのに対して、重力は5次元の理論に従う。このため、宇宙の大域的ゆらぎの振る舞いは、従来の4次元理論と異なる可能性がある。この問題を研究するために、申請論文では、一般次元のバ

ルク時空に対するゲージ不変摂動論の定式化を行い、さらにバルク時空の摂動量とその境界であるブレイン宇宙の摂動量の関係を求めることにより、宇宙の大域的ゆらぎの時間発展を記述する基本方程式を導いている。この定式化は世界で最初のものであり、ブレインワールドモデルの研究に大きな影響を与えた研究として高く評価できる。申請論文では、さらにこの定式化を M 理論に基づくブレインワールドモデルである Horava-Witten モデルに適用し、ブレイン上で膨張宇宙が実現されるいくつかの一樣等方解についてその重力波摂動に対する安定性を考察している。この研究は、ブレインワールドモデルの安定性を 2 次の摂動論を用いて世界で初めて議論し、ゆらぎの非線形効果の重要性を指摘したものとして意義がある。

次に、コンパクト化に関する部分では、超対称高次元統一理論におけるモジュライ問題とそれを回避するモデルの可能性が議論されている。モジュライはコンパクト化された余剰次元の大きさや形状を記述する量で、高次元時空の 4 次元化に伴って 4 次元時空上のスカラ場として現れるものである。このモジュライ場は低エネルギーでの重力定数やゲージ相互作用の強さを決定するため、現在の宇宙ではほぼ定数の一樣な期待値を持つ必要がある。これはモジュライの安定化と呼ばれるが、この安定化は様々な宇宙論的困難を引き起こす。特に、モジュライ場に伴う粒子の崩壊により発生するエントロピーは一般に他の物質のもつエントロピーより何桁も大きくなり、従来の標準モデルで成功していた物質の起源に関する説明を不可能にする。申請論文では、現在最も有力な候補と考えられているヘテロティック超弦模型における非摂動論的效果と宇宙膨張の効果を利用した安定化機構に基づいて、高次元統一理論に普遍的に含まれるモジュライ場であるディラトンに対するモジュライ問題が詳しく研究されている。結果として、ディラトンの質量が 100 TeV 程度で宇宙のバリオン数が Affleck-Dine 機構により生み出されるとすると、ディラトン安定化による膨大なエントロピー生成が起きても宇宙初期の元素合成により現在の軽元素の観測量を説明可能であることが示されている。この結果は、宇宙物質の起源を整合的に説明する宇宙モデルが存在することを現実的な超対称高次元統一理論に基づいて初めて示した研究として高く評価できる。

以上述べたことにより、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値があるものと認める。

なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。