

氏 名	こ やま かず や 小 山 和 哉
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学 位 記 番 号	人 博 第 148 号
学位授与の日付	平成 14 年 3 月 25 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	人 間 ・ 環 境 学 研 究 科 人 間 ・ 環 境 学 専 攻
学位論文題目	Brane World Cosmology (ブレーン世界における宇宙論)

論文調査委員	(主 査) 教 授 松 田 哲	助教授 阪 上 雅 昭	助教授 早 田 次 郎
--------	--------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

重力を含めて、自然界に存在する全ての力を統一的に説明することは理論物理学の重要な問題である。超弦理論はそのような統一理論として最も有力であると信じられている。注目すべきは、超弦理論が時空間の次元が5次元以上である可能性を示唆している点である。一方で、我々の世界は4次元の理論で非常に良く記述されることが分かっている。これまで、この矛盾を解決する方法として、余次元(余次元)は観測できないほど小さくコンパクト化されていると考えられてきた。しかし宇宙が膨張していることを考えると、余次元を小さいままで留めておくことは非常に難しい。近年、超弦理論の発展により、高次元時空中の4次元膜(ブレーン)上に我々が住んでいるという「ブレーン世界」の考えが生まれた。宇宙論にとって最も興味深い点は、このモデルが余次元の不安定性を回避している点である。実際、ブレーン世界では、たとえ余次元が無限に広がっていても、ブレーン上の重力はあたかも4次元に存在するかのように振舞い得る。この可能性を実現する簡単なモデルとして、5次元反ド・ジッター時空(AdS)中に存在する4次元ブレーン(RSモデル)がRandallとSundrumによって提唱された。この新しい宇宙像の検証は現在、宇宙論において最も重要な課題となっている。

本論文の主たる成果は、宇宙背景輻射(CMB)の温度揺らぎを用いてRSモデルを検証するための基礎を与えたことである。このことにより余次元の存在を証明するための理論的基礎が整備された。CMBの温度揺らぎとして観測されるのは4次元ブレーン面上での重力ポテンシャルの揺らぎである。4次元ブレーン上の揺らぎは5次元の時空に摂動を与え、5次元時空の摂動はブレーンの運動に影響を及ぼし、ブレーン上の摂動の進化を変える。このようにして4次元上の温度揺らぎは高次元の重力波と結合し、余次元の存在を感知する。従って、ブレーンモデルでCMBのスペクトルを計算するためには、5次元AdS時空中のブレーン宇宙における宇宙論的摂動の進化を知らなくてはならない。このようにブレーン上の摂動は5次元時空の摂動と切り離すことができない。従って5次元のアインシュタイン方程式を解かなければならない。しかし、膨張するブレーンが存在するAdS時空で、5次元重力場の解を直接求めることは難しい。そこで本論文は次のような方法を提唱している。ブレーン宇宙は、5次元AdS時空を適切な面で切断し、その切断面に沿って、鏡像対称な時空と貼り合わせることで構成できる。適切な切断面はポアンカレ座標からの座標変換で求めることができる。このように、膨張するブレーンが存在するAdS時空は、ポアンカレ座標からの座標変換で求められる。この事実を利用して、5次元重力場の解もポアンカレ座標で解いたものを宇宙論的座標へ変換することで求める。ブレーン上の物理量は接続条件を通して5次元重力場の解から決定する。

以上の方法により本論文で、次のような描像が明らかにされた。AdS時空の曲率によって生じるポテンシャル障壁は、カルツァ・クラインモードがブレーン上の重力場に影響を与えることを妨げるように作用する。このポテンシャル障壁はAdS時空の境界に行くほど高くなり、地平線に近づくると低くなる。宇宙論的に膨張しているブレーンは、膨張に伴ってAdS時空の地平線から境界に向かって運動するため、宇宙の初期ではポテンシャル障壁が低くなり、カルツァ・クラインモードがブレーンに影響を及ぼせるようになる。その結果、宇宙論的摂動の進化は4次元理論からのずれを示すようになる。

逆に元素合成以降では、ポテンシャル障壁が高くなりカルツァ・クラインモードの影響を受けなくなり4次元理論が再現される。

さらに本論文では、カルツァ・クラインモードの効果が具体的に解析され、等曲率密度揺らぎが余次元の重力場によってブレーン上にもたらされることも明らかにされた。この効果は将来CMBのスペクトル観測で検証可能であり、非常に重要な発見である。

本論文ではRSモデルにおける余次元の安定性も解析されている。このモデルではブレーンの位置が余次元の中で変動し得る。この変動が余次元の不安定性を引き起こす可能性がある。本論文ではこの変動を注意深く調べ、RSモデルが余次元の不安定性を回避していることを示している。

さらにRSモデルを理解するうえで重要な側面として、AdS/CFT対応との関係がある。この対応を用いると、ブレーン上の重力は、強結合共形場(CFT)と相互作用する四次元重力として解釈することができる。本論文では、RSモデルに対してAdS/CFT対応による解釈が与えられている。

論文審査の結果の要旨

統一理論として最も有力であると信じられている超弦理論は、時空間の次元が5次元以上である可能性を示唆している。一方で、我々の世界は4次元の理論で非常に良く記述されることが分かっている。この矛盾は、余次元(余次元)が観測できないほど小さくコンパクト化されていると考えることで回避できるというのがこれまでの定説であった。しかし宇宙膨張を考慮すると、余次元を小さいままで留めておくことは非常に難しいことも指摘されていた。近年、超弦理論の発展により、高次元時空中の4次元膜(ブレーン)上に我々が住んでいるという、コンパクト化とは違った矛盾の解決法が明らかになった。この「ブレーン世界」というアイデアが、宇宙論にとって興味深いのは、このモデルが余次元の不安定性を回避している点である。ブレーン世界では、たとえ余次元が無限に広がっていても、ブレーン上の重力はあたかも我々の世界が4次元であるかのように振舞い得る。この可能性を実現する具体的なモデルとして、5次元反ド・ジッター時空(AdS)中に存在する4次元ブレーン(RSモデル)がRandallとSundrumによって提唱された。この新しい宇宙像の検証は現在、宇宙論において最も重要な課題となっている。

本学位授与申請者は、宇宙背景輻射(CMB)の温度揺らぎの観測により、RSモデルを検証することを提唱している。本学位申請論文において、そのための理論的基礎を与え、いくつかの重要な結論を導いている。これらの成果は、余次元の存在を証明するための基礎をも与えている。

CMBの温度揺らぎとして観測されるのは4次元ブレーン面上での重力ポテンシャルの揺らぎである。4次元ブレーン上の揺らぎは5次元の時空に摂動を与え、5次元時空の摂動はブレーン上の摂動の進化を変える。このようにして4次元上の温度揺らぎは高次元の重力波と結合し、余次元の存在を感知する。従って、ブレーンモデルでCMBのスペクトルを計算するためには、5次元AdS時空中のブレーン宇宙における宇宙論的摂動の進化を知らなくてはならない。このようにブレーン上の摂動は5次元時空の摂動と切り離すことができない。しかし、膨張するブレーンが存在するAdS時空で、5次元重力場の解を直接求めることは難しい。そこで本論文は次のような斬新な方法を提唱している。ブレーン宇宙は、5次元AdS時空を適切な面で切断し、その切断面に沿って、鏡像対称な時空と貼り合わせることで構成できる。適切な切断面はポアンカレ座標からの座標変換で求めることができる。このように、膨張するブレーンが存在するAdS時空は、ポアンカレ座標からの座標変換で求められる。この事実を利用すると、5次元重力場の解もポアンカレ座標で求めておいて宇宙論的座標へ変換することで求めることができる。ブレーン上の物理量は接続条件を通して5次元重力場の解から決定する。

以上の方法により本論文で、ブレーン宇宙における宇宙論的摂動理論の枠組みがつけられた。この理論を基に、次のような描像が明らかにされた。AdS時空の曲率によって生じたポテンシャル障壁は、カルツァ・クラインモードがブレーン上の重力場に影響を与えることを妨げるように作用する。このポテンシャル障壁はAdS時空の境界に行くほど高くなり、地平線に近づくると低くなる。宇宙論的に膨張しているブレーンは、膨張に伴ってAdS時空の地平線から境界に向かって運動するため、宇宙の初期ではポテンシャル障壁が低くなり、カルツァ・クラインモードがブレーンに影響を及ぼせるようになる。その結果、宇宙論的摂動の進化は4次元理論からのずれを示すようになる。逆に元素合成以降では、ポテンシャル障壁

が高くなりカルツァ・クラインモードの影響を受けなくなり4次元理論が再現される。

さらに申請者は、カルツァ・クラインモードの効果を具体的に解析し、等曲率密度揺らぎが余次元の重力場によってプレーン上にもたらされることも明らかにした。この効果は将来 CMB のスペクトル観測で検証可能であり、非常に重要な発見である。

このモデルでは余次元の不安定性が引き起こされる可能性がある。申請者はこれを注意深く調べ、RS モデルが余次元の不安定性を回避していることを示した。さらに RS モデルを理解するうえで重要な側面として、AdS/CFT 対応との関係がある。本学位申請論文では、RS モデルに対して AdS/CFT 対応による解釈が与えられている。

以上のように、本論文の研究結果は新しい宇宙像の検証の基礎を与えるということに対して重要な貢献をした。また、本学位申請論文は、人間・環境学専攻自然環境論講座の自然構造基礎分野にふさわしい内容を備えたものと言える。

よって本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成14年1月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。