

氏 名	むら 村 上 豊
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2602 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	Brane World and M-theory (ブレーンワールドと M 理論)

論文調査委員	(主 査) 教 授 九 後 太 一	教 授 川 合 光	助教授 畑 浩 之
--------	----------------------	-----------	-----------

論 文 内 容 の 要 旨

我々の住むこの 4 次元の世界が、実は高次元時空間中に存在する 4 次元の膜 (brane) である、というブレーンワールドのシナリオが近年注目を集めている。このブレーンワールドのシナリオでは主に、実験的に確立されている標準模型の場は 4 次元の膜上に閉じ込められており、重力場は高次元時空間を伝播する、というように考える。この描像は、もともと、重力まで含めた統一理論の候補である超弦理論において発見されたものである。このような発展のなかでブレーンワールドの様々なモデルが発表されたが、中でも Randall と Sundrum によって提唱されたモデルは多くの理由から注目を集めた。一つは warped compact 化という手法を使っていることである。ブレーンワールドのシナリオにおいて、この手法を適用すると、素粒子論における階層性の問題に対して一つの解答を与える、ということが指摘された。二つ目の理由は、このモデルにおいては、必ずしも余剰次元をコンパクトな空間にとる必要はない、ということが発見されたことである。旧来、低エネルギーで通常の重力の法則を高次元空間のシナリオから得るには、余剰次元は必ずコンパクトな空間でなければならないと考えられていたが、彼らの発見により、その制限は必ずしも必要ではないことが認識された。三つ目は、彼らのモデルが、その当時、超弦理論の研究者たちによって AdS/CFT 対応というある種の双対性のもとで調べられていた時空を少し変形しただけのものであったことによる。このことによって、彼らのモデルが、AdS/CFT 対応という観点からも理解できるのではないかと期待され、多くの研究を促した。

そこで申請者は、発表論文において、この Randall と Sundrum のモデルを詳しく調べた。特に、彼らの主張により、高次元空間を使うシナリオは、旧来の Kaluza-Klein のシナリオ、余剰次元がコンパクトなブレーンワールドのシナリオ、および、余剰次元がコンパクトではないブレーンワールドのシナリオの三通りに分類されることになったが、その間の定性的な違いが低エネルギーでも現れないか、という点に着目して考察を進めた。具体的には以下のことを調べている。ブレーンワールドのシナリオでは、我々は高次元空間の中の非常に狭い領域に局在しているのであるが、それゆえ、重力場に対して、ブレーンのまわりに局在した重力波を発生させることができる。これは Kaluza-Klein のシナリオでは自然には行うことができなかった現象であるので、このような波の膜の上の伝播の仕方を調べることで、三者の違いが現れないかどうかを調べた。その結果、余剰次元がコンパクトではないブレーンワールドのシナリオでは、このような局所的な擾乱は、他のシナリオとは違い、十分時間が経った後、べき的な減衰を示すことを明らかにした。また、通常の 4 次元の波は light-cone 上のみを伝播するが、このような余剰次元があるときの波は、light-cone の内側にも伝播することを示した。しかし残念ながら、重力場に関しては、このような波は非常に弱く、実際に観測するのは難しいことがわかった。ところが、実際の観測との比較を考察する途上で、Randall と Sundrum のモデルが注目を集めた三番目の理由である AdS/CFT 対応という観点からも、この波の振る舞いを理解することができることを発見した。

主論文では、上記のことを含め、ブレーンワールドの現状を振り返っている。特に様々な特性を持っている warped compact 化を中心にして話をまとめている。その中では上記のこと以外に、超弦理論、およびその非摂動論的な実体である

うと期待される M 理論からブレーンワールドの描像が如何に出てくるか、ということに触れている。特にそのうち、ヘテロティック弦理論の強結合領域を記述すると考えられている、ヘテロティック M 理論を使ったブレーンワールドのシナリオに関して詳細に解説しており、そこでは warped compact 化が自然に現れることを明らかにしている。またヘテロティック M 理論以外のブレーンワールドのシナリオである intersecting brane のシナリオや、 G_2 多様体のシナリオについても簡単に触れており、この種の超弦理論、および M 理論を使ったブレーンワールドの話では、flux が重要な働きをする、ということを描している。

論文審査の結果の要旨

我々のこの 4 次元(空間 3 次元+時間 1 次元)世界が、実は高次元時空中に存在する 4 次元の膜(brane)である、というブレーンワールドのシナリオが近年注目を集めている。このブレーンワールドのシナリオでは、標準模型のゲージ場やクォーク・レプトン場は 4 次元の膜上に閉じ込められており、重力場は高次元時空間を伝播する、というように考える。一見このシナリオは無理ではないかと思えるが、重力の実験が必ずしもミクロのレベルにおいてはなされていないという指摘が Arkani-Hamed 達によってなされ、その後の様々な研究によって、ブレーンワールドの可能性が実験的に必ずしも排除されていないことがわかってきた。また最近急速に発展した、重力まで含めた統一理論の唯一の候補である超弦理論においても、膜の存在が非常に重要であることが認識され、もともとその研究において、ゲージ理論の場が膜の上に閉じ込められていることが発見された。このことによって、量子論としてもブレーンワールドのシナリオがありうるものであることが理解された。

このような理論展開のなかでブレーンワールドの様々な模型が発表されたが、その中で特に、Randall と Sundrum によって提唱された模型は、論文要旨のところで述べた多くの理由から注目を集めた。申請者は、発表論文において、この Randall と Sundrum の模型を詳しく調べた。高次元空間を使うシナリオは、旧来の Kaluza-Klein のシナリオ、余剰次元がコンパクトなブレーンワールドのシナリオ、および、余剰次元がコンパクトではないブレーンワールドのシナリオ、の三通りに分類されることになったが、申請者は、その間の定性的な違いが低エネルギーでも現れないか、という点に着目して考察を進めた。具体的には以下のことを調べている。ブレーンワールドのシナリオでは、我々は高次元空間の中の非常に狭い領域に局在しているのであるが、それゆえ、重力場に対して、ブレーンのまわりに局在した重力波を発生させることができる。これは Kaluza-Klein のシナリオでは自然には行うことができなかった現象であるので、このような波の膜の上の伝播の仕方を調べることで、三者の違いがどう現れるのかを調べた。その結果、余剰次元がコンパクトではないブレーンワールドのシナリオでは、このような局所的な擾乱は、他のシナリオとは異なり、十分時間が経った後にべき的な減衰を示すことを明らかにした。また、通常の 4 次元の波は light-cone 上のみを伝播するが、このような余剰次元があるときの波は、light-cone の内側にも伝播することを見出した。しかし残念ながら、重力場に関しては、このような波は非常に弱く、実際に観測するのは難しい。一方、実際の観測との比較を考察する途上で、申請者は、Randall と Sundrum の模型が注目を集めた三番目の理由である AdS/CFT 対応という観点からも、この波の振る舞いを理解することができることを発見した。

学位申請の主論文では、発表論文でのこれらの結果を含めて、ブレーンワールドの研究の現状を総括的に振り返り、特に様々な特性を持っている warped compact 化を中心にして話をまとめている。その中では上記のこと以外に、超弦理論、およびその非摂動論的な実体であろうと期待される M 理論からブレーンワールドの描像が如何に出てくるか、ということにも触れている。特にそのうち、ヘテロティック弦理論の強結合領域を記述すると考えられている、ヘテロティック M 理論を使ったブレーンワールドのシナリオに関して詳細に解説しており、そこでは warped compact 化が自然に現れることを明らかにしている。またヘテロティック M 理論以外のブレーンワールドのシナリオである intersecting brane のシナリオや、 G_2 多様体のシナリオについても簡単に触れており、この種の超弦理論、および M 理論を使ったブレーンワールドの話では、flux が重要な働きをする、ということを描している。

以上これらは、発表論文のオリジナルな寄与のほか、広範な研究のバックグラウンドと最前線の成果を明快に解説したものであり、よって、本申請論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。

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。