

論文内容の要旨

論文題目 Brane gravity and dynamical stability in warped flux compactification
(ワープしたフラックスコンパクト化におけるブレン重力と動的安定性)

氏名 吉口 寛之

本論文の主要テーマは、我々が見出した6次元のブレンワールドモデルにおける「ブレン重力の高次元的理解」である。このモデルでのブレン重力をある単純化した場合で解析し、解の動的安定性も調べた。

近年、統一理論の候補として超弦理論が注目を集めている。この理論は、全ての粒子をたった二種類の弦（開弦と閉弦）の振動モードとしてあらわせる可能性を持ち、また、重力子と解釈可能なスピン2の質量ゼロの粒子を必ず含むといった魅力的な点をもつ一方で、我々の住んでいる世界は10次元時空であるという驚くべき予言をする。しかし、当然我々が日常感じている時空は4次元であるため、この次元の違いを埋め合わせる必要がある。昔からよく知られた解決方法はカルーツァ・クラインコンパクト化というもので、6つの余剰次元が小さくまるまっていて我々には見えないとする。しかし、最近の超弦理論の進展により、我々の4次元世界は10次元時空中の膜（ブレン）である、とする新たな埋め合わせの機構が考えられ始めた。

ランドールとサンドラムは二つの興味深いブレンワールドの現象論的モデルを提案した。一つ目のモデル (RS1) では、5次元の反ドジッター時空中に正と負の張力を持つ二つのブレンを置き、物質場はブレンに束縛されているが重力子だけが時空全体（バルク）を

伝播するという状況を考え、我々が負の張力をもつブレーンに束縛されているとすれば、階層性問題が説明できることを示した。しかし、このモデルではブレーン間の距離をあらゆる場（ラディオ）が4次元重力子と結合してしまうため、アインシュタイン重力を再現するにはラディオの安定化機構を導入する必要がある。二つ目のモデル（RS2）では、5次元反ドジッター時空中に正の張力をもつブレーンを一枚置き、その上でアインシュタイン重力が低エネルギーで再現されることを示した。このモデルでは余剰次元は無限に広がっており、余剰次元をコンパクト化しなくてもアインシュタイン重力を再現できることを示した点で興味深い。

以上のモデルを基に、ブレーンワールドにおける弱重力、宇宙論、ブラックホールなど様々な現象が議論されているが、これまでの研究は5次元時空のモデルにおけるものが大半である。これは余剰次元が2以上の物体を相対論的に扱うことが難しいためであるが、上で述べたように超弦理論が予言するのは10次元である。したがって、余剰次元が1より大きい場合のブレーンワールドの研究も重要である。

本研究では、向山信治、仙洞田雄一、木下俊一郎との共同研究により、6次元ブレーンワールドモデルの厳密解を見つけた。このモデルでは、ワープしたコンパクトな余剰次元がフラックスにより安定化されており、1つもしくは2つのブレーンを置くことができる。したがって、ラディオの安定化機構を導入したRS1モデルを拡張したモデルであると言える。また、超弦理論におけるドジッター真空の構築において重要なワープしたフラックスコンパクト化（warped flux compactification）とも、ワープした余剰次元をフラックスで安定化している点で類似している。本研究のテーマは、この6次元ブレーンワールドモデルにおけるブレーン重力の高次元的理解である。

ここで過去の高次元モデルにおける4次元アインシュタイン重力の再現について見てみる。まずカルーツァ・クラインコンパクト化の場合は、余剰次元方向の運動量保存則のためゼロモードとカルーツァ・クライン（KK）モードが線形では結合していないため、コンパクト化に対するモジュライが安定化されていれば4次元重力が再現する。次にRS2モデルの場合は、物質がブレーンという特異な物体に束縛されているため、運動量保存では物質とKKモードの相互作用は禁止されない。しかし、余剰次元がワープしているためにゼロモードがブレーン近傍に局在しているので、KKモードよりゼロモードとも結合が強く、ブレーン上で4次元重力が再現される。

では、ワープしたフラックスコンパクト化の場合はどうであろうか。この場合RS2と同様にブレーン上の物質はKKモードとも相互作用する。しかし、RS2とは違い、我々が住むブレーンはワープファクターが周りより小さいところでもありうるため、ゼロモードは必

ずしもブレーンに局在していない。したがって、ブレーン上の物質の進化によりブレーン近傍だけでなく、バルク全体の幾何が変更を受ける。にもかかわらず、余剰次元のモジュライが安定化されていれば、ブレーン上の物質の進化、保存量などの境界条件からユニークに決まるある形状にバルクは落ち着く。こういった過程を通してブレーン上に誘発される幾何はブレーン上の物質の進化に反応するのである。ワープしたフラックスコンパクト化における重力を高次元的に理解するには、この間接的で複雑な関係からアインシュタイン重力が本当に再現されるかを見るのは非常に重要である。

そこで、私は、研究の第一歩として我々が見つけたブレーンワールドモデルでそれぞれのブレーンの張力が変化したときにハッブル膨張率がどの程度変化するかを解析した。結果としては、この解析から得られる有効ニュートン定数が6次元の作用で余剰次元を積分することにより予想されるものと一致することがわかった。

次に、この解の動的安定性を調べ、余剰次元のモジュライが安定化されているかを見た。簡単のため、余剰次元の軸対称性を課しこの解のまわりでの線形摂動を考えた。摂動は4次元ミンコフスキー空間のスカラー、ベクトル、テンソル型調和関数で展開でき、それぞれの型について解析を行った。全ての型で不安定なモードは存在しないことを示し、また、テンソルの場合のみ4次元の重力子に対応するゼロモードがあることがわかった。さらに、ゼロモードと KK モードの間にはマス・ギャップがあることも見つけた。上で述べたように、ワープしたフラックスコンパクト化の場合物質と KK モードは結合しており、かつ、ブレーン近傍にゼロモードは局在していないのでアインシュタイン重力の再現は一見明らかでない。しかし、マス・ギャップのため低エネルギーでは KK モードの励起が抑圧されるために4次元重力が再現するのだと考えられる。

ワープしたフラックスコンパクト化は、超弦理論に基づいた現実的な宇宙論の構築に向けて、今後、重要な役割を果たすと考えられる。しかし、ワープした領域、コンパクト化、モジュライ安定化を含む、具体的な10次元解は現時点では与えられておらず、仮に将来的に与えられても、非常に複雑なものであると考えられる。この様な状況では、調べようとする側面のみに着目した Toy Model が必要不可欠であると考えられる。本論文で与えられた厳密解は、6次元の単純化されたモデルではあるが、ワープした領域、コンパクト化、フラックス、モジュライ安定化の全てを含んでいる。線形重力の再現、インフレーション宇宙論、ブラックホールの性質の定性的解析等の応用に役立つと期待される。