

(論文内容の要旨)

近年、観測から現在の宇宙が加速膨張をしていることが明らかになってきた。この観測事実を説明する理論モデルは数多く提案されているが、それらの多くは実質的には新たにスカラー場に相当する自由度を理論に導入するモデルとして統一的に理解することができ、多くの研究がなされている。それに対し本論文では、このクラスに当てはまらない重力理論の修正により宇宙の加速膨張を説明するモデルの可能性について論じた。

このような修正重力理論の多くは、重力子が有限の質量をもつモデルになっている。現在の宇宙の加速膨張を説明するようなモデルでは、特別な機構がはたかなければ重力子の質量 m が現在のハッブルパラメータ H 程度になることが予想される。しかし、 H が一定の値をとるド・シッター時空中において、条件 $m^2 < 2H^2$ が満たされると、重力子の5つの偏極成分のうちヘリシティー0のモードがゴーストになることが知られている。一般にはゴーストの存在は理論の破綻を招くと言われているが、本論文は、「加速膨張を実現し、ゴーストが現れないモデルを構築することが可能か」、「ゴーストの存在は本当に理論の破綻を招くか」、という2つの点を再検討したものである。

まず、ヘリシティー0ゴーストが存在するものの加速膨張を実現することができるブレーンワールドのモデルを修正し、ゴーストの存在しないモデルの構築を試みている。ブレーンワールドとは、「“バルク”と呼ばれる5次元時空中に4次元の対象物“ブレーン”を考え、標準模型に現れる場はブレーン上にとらわれており、重力のみが高次元を伝搬する」という宇宙モデルの総称である。4次元の意味での有効質量 m はバルクの広がり具合に依存している。そこで、新たなブレーンをバルク中に導入し、有効質量 m を増加させることにより、 $m^2 > 2H^2$ となるようにモデルを修正することを試みた。この修正により、重力子のゴーストを消すことができたが、ブレーンの揺らぎの自由度がゴーストとなった。さらに、ブレーンのゆらぎを固定する機構を導入する修正を試みているが、ゴーストを消すことはできなかった。

ゴーストが理論の破綻を招くといわれる理由は、負のエネルギーを持つゴーストが、正のエネルギーを持つ通常の粒子と自発的に対生成を起こすからである。この生成率が十分に抑えられていれば、問題はない。ローレンツ対称性を持つ理論においては、ローレンツブーストした反応も同じ確率で起こる。そのため、生成される粒子数密度は必然的に紫外発散をとまなう。しかし、本論文において有質量重力子のゴーストが存在するとき、ブースト不変な真空が存在しないことが示された。そのため上記の生成率の発散の議論は成り立たない。さらに本論文では、対生成により生成される粒子数密度の計算をおこなっている。ブースト不変性が破れているため、3次元運動量にカットオフが表れることが期待される。得られた結果は、仮に3次元運動量カットオフのスケールをプランクスケール程度に大きくしたとしても粒子数密度は十分に抑えられるというものであった。したがって、ゴーストによる理論の破綻は起きない可能性があるという結論が導かれた。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、観測される現在の宇宙の加速膨張を説明するモデルとして、新たなスカラー場を導入するのではなく、重力理論をより本質的に変更する可能性について論じている。そのような修正重力理論を考えると多くの場合、重力子が有限の質量をもつモデルとなる。現在の宇宙の加速膨張を説明するようなモデルを考えると、特別な機構がはたらかなければ重力子の質量 m が現在のハッブルパラメータ H 程度であることが要求されることが予想される。しかし、 H が一定の値をとるド・シッター時空において、条件 $m^2 < 2H^2$ が満たされると、重力子の5つの偏極成分のうちヘリシティー0のモードがゴーストになることが知られている。そのため、ゴーストを含まないようにした上で、加速膨張を引き起こすような修正重力理論のモデルを構築することは困難である。一般にゴーストが存在するようなモデルは理論として破綻していると考えられており、このような種類の重力理論の修正では宇宙の加速膨張を説明できないとされている。このような一般に思われている主張に対し、本論文では、「加速膨張を実現し、ゴーストが現れないモデルを構築することが可能か」、「ゴーストの存在は本当に理論の破綻を招くか」、という2つの観点から疑問を投げかけ、再検討がなされた。

まずは、ヘリシティー0ゴーストが存在するものの加速膨張を実現することができるDGPブレーンワールドモデルを修正することにより、ゴーストの存在しない加速膨張宇宙モデルの構築が試みられた。様々な試みがなされたがゴーストを消すことはできず、一般にモデルの連続的な修正ではゴーストを消すことが不可能であるということを示唆する結果を与えた。

次に、ゴーストの存在が本当に理論の破綻を招くのかという疑問に対して再考察がなされた。本論文の結論として、「ゴーストによる理論の破綻は起きない可能性がある」という主張が導かれている。通常、ゴーストの存在が理論の破綻を意味するといわれる理由は、負のエネルギーを持つゴーストが、正のエネルギーを持つ通常の粒子と自発的に対生成を起こすからである。ローレンツ対称性を持つ理論においては、ローレンツブーストした反応も同じ確率で起こるため、生成される粒子数密度を計算すると必然的に紫外発散を起こす。しかし、本論文ではまず、ヘリシティー0ゴーストが存在するモデルではブースト不変な真空が存在しないため、上記の生成率の発散の議論は成り立たないことを示し、さらに具体的に対生成により生成される粒子数密度を評価することで生成される粒子数密度が十分に小さく抑えられるということを示した。学位論文は基礎的なレビューを含めて、上記の内容が首尾一貫した形でまとめられている。

上述のように内容の独自性という点についても充分と判断される。これらの独自の成果は共同研究によるものであるが、審査対象者の寄与が十分に大きいということが認められた。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、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。