

ふりがな	たかはし りょう
氏名	高橋 亮
学位	博士 (理学)
学位記番号	新大院博 (理) 第282号
学位授与の日付	平成 20年 3月 24日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
博士論文名	ダークエネルギーの候補としての Mass Varying Neutrinos シナリオの安定性について

論文審査委員	主査	教授	谷本 盛光
	副査	教授	田村 詔生
	副査	教授	松尾 正之
	副査	教授	五十嵐 尤二
	副査	准教授	西 亮一
	副査	准教授	中野 博章
	副査	准教授	浅賀 岳彦

博士論文の要旨

背景

最近の宇宙の観測データは、現在の宇宙が空間的に平坦で加速膨張していることを強く示唆している。一方、銀河や銀河団の公転運動の様子から、その公転軌道内には目には見えない物質が必要であることがわかっている。これがダークマターと呼ばれる未知の物質である。このダークマターのエネルギー密度は宇宙全体のエネルギー密度の約 22% を占めるが、既知のエネルギー成分と合わせても残りの約 74% が不足している。この不足分がダークエネルギーと呼ばれる未知のエネルギー成分であり、これが現在の宇宙の加速膨張を引き起こしていると考えられている。ダークエネルギーの正体の可能性の一つとして、Fardon, Nelson, Weiner らによって 2004 年に提唱された “Mass Varying Neutrinos” シナリオがある。このシナリオでは “アクセレロン” と呼ばれる未知のスカラー場と “ステライルニュートリノ” と呼ばれる未知のフェルミオンが導入される。アクセレロンはステライルニュートリノとのみ相互作用するが、ステライルニュートリノは通常のニュートリノ (アクティブニュートリノと呼ぶ) と相互作用をする。その結果、アクティブニュートリノの質量はアクセレロン場に依存することになる。そのため、アクセレロンがそのポテンシャル上を真空に向けてダイナミカルに発展すれば、それに伴いニュートリノの質量もダイナミカルに変化することになる。このアクティブニュートリノは初期宇宙に熱平衡から離脱した宇宙背景ニュートリノであり、そのエネルギー密度とアクセレロンのポテンシャルエネルギーを合わせた系はダークエネルギーの性質を実現している。以上がこのシナリオの基本的な考え方である。このシナリオに基づいて、素粒子実験や宇宙の観測データに矛盾しない現実的なモデルの構成が試みられているが、一方で Afshordi, Zaldarriaga, Kohri らはこのシナリオに含まれる深刻な不安定性を流体力学的な観点から指摘した。このシナリオではニュートリノ - アクセレロン流体がダークエネルギーとして振舞うが、彼らはニュートリノが完全に非相対論的になった場合、この流体中の音速は虚数になることを指摘した。これによりニュートリノはクラスター化し、その流体はもはやダークエネルギーとして振舞うことができなくなる。しかし後述するように、本研究は、この不安定性をある条件のもとで回避できることを明らかにしている。

問題設定

Mass Varying Neutrinos シナリオでは、観測と矛盾しない具体的なモデルがいくつか提案されているが、モデルが流体力学的に安定であるか、また、素粒子論的な観点から、輻射補正に対して安定であるかという理論的問題が検討されていない。また、スカラーポテンシャルは代表的な関数を人為的に与えその起源があきらかになっていない。これらの理論的問題に、取り組むため流体力学的に安定な条件を一般的に求めること、このシナリオを輻射補正に対して安定な超対称性理論へ拡張することを試みている。

本論分の説明と結果

本論文では、Mass Varying Neutrinos シナリオが流体力学的に安定である条件を求めるため、ニュートリノを非相対論的極限で扱うのではなく、相対論的補正項を計算し、その大きさを評価している。その結果、ニュートリノ質量がアクセロンに依存し変化する項と、変化しない定数項があるモデルでは、安定性が保たれることが判明した。

以上の結果を踏まえ、超対称性が成り立っている場合の実現可能ないくつかのモデルが提案されている。とりわけ、超対称性の破れの影響も含めた考察が行なわれている。ここでは、私たちが住む世界 (visible sector) と、超対称性の破れが伝達されてくる隠された世界 (hidden sector)、そしてアクセロンとステライルニュートリノが住む世界 (dark sector) を考える。超対称性の破れが、TeV のエネルギースケールにある hidden sector から meV のエネルギースケールにある dark sector へ重力によって伝達されるとすると、その破れの大きさは、ダークエネルギーと同程度の大きさになることが示されている。その状況下では輻射補正に対してモデルが安定であることを示している。

具体的な数値計算は以下のように行われている。アクセロンとステライルニュートリノを一つのカイラル超場によって記述し、スーパーポテンシャルを構成することによって、いくつかの相互作用の形を書き下すことができる。それらの相互作用の大きさは、観測値によって決定されるパラメータである。アクセロンのポテンシャルエネルギーはスーパーポテンシャルから計算され、未知のパラメータは、超新星爆発の観測からくる制限を考慮したうえで決定されている。

そして、状態方程式パラメータ w とニュートリノの質量の変化が、宇宙の時間発展の関数として、数値的に示されている。

その結果の分野への影響

Mass Varying Neutrinos シナリオの流体力学的安定性の研究については、このシナリオの可否に関わる重要な問題であり、安定性の条件の一つを示したことにより、この分野の研究に弾みを与えた。また、このシナリオの超対称性化は、世界で最初のものであり、注目を与えている。

審査結果の要旨

本論文は、宇宙のダークエネルギーの解明という大問題に素粒子論の立場から取り組んだものである。

ダークエネルギーがニュートリノにかかわっているというシナリオの理論的精密化をめざしたものであり、その意義は大きい。Mass Varying Neutrinos シナリオの流体力学的安定性の研究は世界的にも注目されている。また、いち早くシナリオの超対称性化をめざし、成功した意義も大きい。

観測や実験にかかわる現象論的問題は、今後の課題として残されているが、現時点での本論文の価値は高いと判断される。

以上によって、本論文は博士論文として十分値するものと判断した。

なお、本研究は、ダークエネルギーを素粒子論的に解明しようとする基礎研究であるので、博士(理学)が適当であると判断した。