

氏 名（本籍）	<small>なか むら しん たろう</small> 中 村 進太郎（東京都）
学 位 の 種 類	博士（理学）
学 位 記 番 号	甲第 1227 号
学位授与の日付	2021 年 3 月 18 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学 位 論 文 題 目	Cosmology in vector-tensor theories with interaction between dark components (暗黒成分間の相互作用を伴うベクトル-テンソル理論における宇宙論)

論文審査委員 (主査) 教授 松下 恭子

教授 長嶋 泰之	教授 二国 徹郎
准教授 堺 和光	教授 佐古 彰史
教授 辻川 信二	

論文内容の要旨

現代宇宙論において、未だ正体の明らかにされていない暗黒成分が 2 種類ある。1 つは宇宙を加速膨張させる源である暗黒エネルギー、もう一方は宇宙の大規模構造を形成する主成分である暗黒物質である。最新の観測からは、現在の宇宙の組成のうち約 70% が暗黒エネルギー、約 25% が暗黒物質であることが示唆されている。これは、バリオンのような既知の物質は 5% 程度に過ぎず、正体不明の暗黒成分が現在の宇宙の 95% を占めることを意味する。これらの問題は、一般相対論や素粒子の標準模型の枠組みでは取り扱いが困難であり、それらを超えた理論の存在を示唆している可能性がある。

暗黒エネルギーは、1998 年に Ia 型超新星の観測によって発見された後期宇宙加速膨張の源であり、近年では宇宙背景放射 (CMB) やバリオン音響振動 (BAO) などからもその存在が示唆されている。例えば、暗黒エネルギーが存在した場合に CMB へ与える影響は、CMB パワースペクトルのピークの位置の変化に現れる。さらに CMB の温度揺らぎには、宇宙の晴れ上がりから現在までの重力ポテンシャルの時間変化に関する積分ザックス-ヴォルフ (ISW) 効果によって生じる揺らぎが含まれている。ISW 効果に起因する温度揺らぎは宇宙論的分散の影響が強いスケールに関わるため直接検出することが困難だが、ISW 効果からの温度揺らぎと銀河の個数密度分布には正の相関関係があることが観測によ

って明らかにされている．もしも物質が支配的な宇宙であれば，大スケールでの重力ポテンシャルが時間変化しないため，このような相関関係は現れない．従って，この結果は暗黒エネルギーの存在を示す証拠の一つであり，ISW 効果は暗黒エネルギー模型を選別するプローブとなり得る．

現代宇宙論における標準的な宇宙進化のシナリオは，暗黒エネルギーとしての宇宙定数と冷えた暗黒物質（CDM）を仮定した模型（ Λ CDM 模型）で与えられる．この模型は現在観測されている宇宙膨張や構造形成，宇宙背景放射の温度揺らぎなどを無矛盾に説明できる．しかし近年，「ハッブル定数」と「8Mpc スケールの物質密度揺らぎの振幅」という二つの物理量に関して， Λ CDM 模型を仮定して得られた Planck 衛星による宇宙背景放射（CMB）の観測データと，ハッブル宇宙望遠鏡などによる低い赤方偏移における観測データから得られる値に食い違いが生じるという不一致問題が指摘されている．この問題は観測の精度が高くなるほど深刻になっており，系統誤差などに起因する可能性もあるが，標準宇宙シナリオである Λ CDM 模型の拡張の必要性を示唆している可能性も考えられる．

Λ CDM 模型の自然な拡張方法として，暗黒エネルギーを宇宙定数ではなく時間変化する新たな物理的自由度として考えることができる．中でも，一般相対論に対してスカラー場の自由度を導入することによって拡張された重力理論の枠組みはスカラー・テンソル理論と呼ばれている．スカラー・テンソル理論の例として，一般相対論に対して正準スカラー場を導入したクインテッセンスや，一般相対論のラグランジアンをスカラー曲率の関数として拡張する $f(R)$ 重力理論，場の非線形相互作用を含むガリレオン模型などが挙げられる．これらの模型はホルンデスキ理論と言う一般的な枠組みに包含される．ホルンデスキ理論は，運動方程式を微分について 2 次のオーダーに保つ最も一般的なスカラー・テンソル理論である．この理論に含まれる物理的自由度は，重力場の自由度 2 つとスカラー場の自由度 1 つの計 3 つである．

暗黒エネルギーを担う場としてはスカラー場だけでなくベクトル場も考えられる．スカラー・テンソル理論の場合と同様に，一般相対論に対してベクトル場の自由度を導入した枠組みはベクトル・テンソル理論と呼ばれている．しかし，電磁場のように $U(1)$ 対称性を保ったベクトル場の場合，ホルンデスキ理論のようなラグランジアンを構成することができないことが C. Deffayet らによって no-go 定理として示されている．一方で，有質量ベクトル場の場合には $U(1)$ 対称性が破れているために，ホルンデスキ理論のようなラグランジアンを構成することが可能となり，L. Heisenberg によって有質量ベクトル場と重力場が結合した理論（一般化された Proca 理論，GP 理論）が構築された．GP 理論は運動方程式が微分について 2 次のオーダーに保たれたベクトル・テンソル理論であり，合計 5 つの物理的自由度を持つ．具体的には，重力場の自由度が 2 つ，横波モードが 2 つ，そして $U(1)$ 対称性の破れにより生じる縦波モード 1 つの計 5 つである．先行研究において，有質量ベクトル場による暗黒エネルギー模型では，縦波モードに対応する時間成分の存在によって宇宙膨張が Λ CDM 模型とは異なり，結果としてハッブル定数の不一致問題を緩和できる可能性があることが示されている．

本研究では，ベクトル・テンソル理論において，宇宙論パラメータの不一致問題を緩和可

能な暗黒エネルギー模型の構築を目指した。第一に申請者らはベクトル・テンソル理論に基づく暗黒エネルギー模型への観測的制限を議論する準備として、前述した ISW 効果と銀河の個数密度分布の間の相関関数についてベクトル・テンソル理論ではどのような兆候が現れるかを調べた。この相関関数は観測的に正值をとることが示唆されているが、スカラー・テンソル理論の場合には負値をとる傾向にあり、正值を持つ模型を自然に作ることが難しいことが指摘されていた。これは重力と非線形に結合したスカラー場が存在することにより密度揺らぎが重力的に集まりやすくなり、重力ポテンシャルの成長が促進され、そのポテンシャルを通過した CMB 光子の波長が赤方偏移することが要因である。申請者らはベクトル・テンソル理論の場合に、固有ベクトルモードが存在することで観測と整合的な正值の相関関数をもつ暗黒エネルギー模型を自然につくることが可能であることを初めて示した。さらにこの性質を踏まえた上で、CMB や Ia 型超新星などの複数の独立な観測データによる統計解析を行った。その結果、ISW-銀河相関の観測結果を含めても、 Λ CDM 模型に比べてベクトル場による暗黒エネルギー模型のほうが観測的に有意であることを示した。これは、 Λ CDM 模型で生じるハッブル定数の不一致問題を解消できる模型がベクトル・テンソル理論では構築可能であることと、そのような模型でも ISW-銀河相関は正值を示していることに起因している。

上記の議論で、ベクトル場による暗黒エネルギー模型はハッブル定数の不一致問題が緩和できることを示したが、物質密度揺らぎの振幅の不一致問題についてはさらに議論する必要がある。一般的に、重力理論を一般相対論から拡張すると重力定数がニュートンの万有引力定数からずれて時間変化をする（有効重力結合）。2017 年に検出された中性子星連星の合体による重力波の観測結果から、重力波の伝搬速度が高い精度で光速と等しいことが明らかにされた。これを踏まえて、重力波の伝搬速度が光速と完全に等しいと仮定すると、ホルンデスキ理論の場合には現在付近における有効重力結合が万有引力定数よりも大きくなることで不一致問題を悪化させる傾向にある一方で、GP 理論では横波モードの存在により有効重力結合を万有引力定数と同等に抑えることが可能ではあるが Λ CDM 模型の場合よりも不一致が改善されることはない。この問題を解決する方法の一つとして、物質の大部分を担う暗黒物質が暗黒エネルギーとの相互作用を持つ可能性が議論されている。この場合、暗黒物質の一部が暗黒エネルギーに崩壊することにより、現在付近における物質密度揺らぎの成長率が Λ CDM 模型の場合よりも小さくなり、不一致問題を緩和できる可能性が指摘されている。

スカラー・テンソル理論において暗黒成分が相互作用する模型としては、例えば L. Amendola によって構築された *coupled quintessence* が挙げられる。このような模型では暗黒成分間でのエネルギーの輸送が行われ、暗黒エネルギーと物質場のエネルギー密度が一定の関係にあるような宇宙論解（スケーリング解）が存在する。申請者はベクトル・テンソル理論の枠組みで暗黒成分間のエネルギー輸送が存在する場合の加速膨張解について議論した。その結果、ベクトル場の場合にはスケーリング解とは異なる宇宙論解が存在することを示し、暗黒物質の一部がベクトル場に崩壊する場合には、物質優勢期における暗黒エネルギーの状態方程式が観測と整合的な模型を構築できることを示した。また、暗黒物

質の揺らぎに関するゴースト自由度の出現を避ける条件から、暗黒エネルギーの状態方程式の取り得る値が制限されることを明らかにした。さらに申請者らは暗黒成分間に運動量輸送が存在するモデルをベクトル・テンソル理論に基づいて議論した。このような運動量輸送は、暗黒エネルギーを担う場と暗黒物質の四元速度が結合した場合に起こり、エネルギー輸送の場合と異なり、連続の方程式は新たな相互作用による変更を受けない。そのため背景時空の時間発展に影響は与えないが、揺らぎの進化にはこの新たな相互作用が大きく影響する。具体的には、大規模構造に関するスケールでの有効重力結合が、低い赤方偏移では万有引力定数よりも小さくなるモデルを構築することが可能になる。この結果は、暗黒成分間の相互作用が存在するために、現在付近における物質密度ゆらぎの成長率が Λ CDM 模型の場合よりも小さくなり、観測から示唆されている不一致問題を緩和できる可能性があることを示している。

以上のように本研究では、一般相対論をベクトル場の導入によって拡張した重力理論の枠組みにおいて、近年の観測から示唆されている宇宙論パラメータの不一致問題を解決できる暗黒エネルギーモデルの構築を行った。ベクトル・テンソル理論に基づいて構築されたモデルは Λ CDM 模型やスカラー・テンソル理論におけるモデルと観測的に区別でき、今後の高精度観測データの蓄積および理論研究の向上により、暗黒エネルギーの起源解明に大きな貢献をもたらすと期待される。

論文審査の結果の要旨

本論文では暗黒エネルギーと暗黒物質という二つの暗黒成分間での相互作用を考慮したベクトル・テンソル理論に基づく宇宙論模型に関して研究しており、その理論的・観測的な妥当性、及び有効性について審査を行った。暗黒エネルギーは、Ia 型超新星の観測によって 1998 年に発見された宇宙の後期加速膨張の源である。一方、暗黒物質は宇宙の大規模構造が形成される上で主要な役割を果たす物質である。最新の観測によると、現在の宇宙の組成比のうちおよそ 70% が暗黒エネルギーに、25% が暗黒物質によって占められている。これら二つの暗黒成分はその起源が明らかになっておらず、様々な理論模型がこれまでに提唱されてきた。また、近年の観測から、ハッブルパラメータと宇宙の密度揺らぎの振幅という二つの物理量に関して、宇宙背景輻射 (CMB) という大スケールでの観測結果から得られた値と、近傍の銀河の観測から得られた値が一致しないという不一致問題が指摘されている。本論文では暗黒エネルギーとしてベクトル場を考え、宇宙論的なダイナミクスと可観測量の時間発展にベクトル場が与える影響を精査し、更に暗黒成分間の相互作用による不一致問題緩和の可能性について議論している。本論文の構成は以下のとおりである。

第一章から第三章までは、宇宙の後期加速膨張の観測的証拠や近年の観測から指摘されている不一致問題、これまでに提唱されてきた暗黒エネルギーの理論模型と各模型へ

の観測的な制限に関して概観し、本論文の研究背景や動機について説明している。

第四章では、ベクトル・テンソル理論に基づき宇宙論的背景時空における基礎方程式と摂動に対する理論の一般的な安定性の条件を求めている。更に、具体的な理論模型に関して宇宙論的なダイナミクスと、安定性の条件による模型への制限を明らかにしている。

第五章では、重力ポテンシャルの時間変化が CMB の温度ゆらぎに与える影響である積分ザックス・ヴォルフ (ISW) 効果に着目し、第四章で議論したベクトル・テンソル理論においてベクトル場が ISW 効果にどのような影響を与えるのかを議論している。ISW 効果は銀河の個数密度分布との間に正の相関があることが知られているが、暗黒エネルギーの源としてスカラー場を導入したスカラー・テンソル理論では負の相関が現れる傾向にある。一方、本論文ではベクトル・テンソル理論に基づく固有ベクトルモードの存在により正の相関を持つ理論模型を構築できることを本論文では示している。更に、複数の独立した最新の観測データを用いてモンテカルロシミュレーションを行い、ベクトル・テンソル理論ではハッブル定数の不一致問題を解消し観測的に好まれる暗黒エネルギー模型の構築が可能であることを示している。

第六章では、暗黒物質と暗黒エネルギーの相互作用を取り入れたベクトル・テンソル理論に基づき、特にエネルギー輸送型の相互作用に着目して宇宙論的なダイナミクスに与える影響を明らかにしている。このような相互作用が存在する場合、暗黒エネルギーの状態方程式は相互作用なしの場合と比較して大きな値をとり、観測的に好ましい暗黒エネルギー模型の構築が可能であることが示された。

第七章では、二つの暗黒成分間に運動量輸送型の相互作用を取り入れたベクトル・テンソル理論について研究を行っている。第五章で議論した相互作用なしのベクトル・テンソル理論の場合、ハッブルパラメータの不一致問題については解決しうるが、宇宙の密度揺らぎの振幅に関する不一致問題が改善されることはない。一方、運動量輸送型の相互作用を導入したベクトル・テンソル理論の場合、低赤方偏移領域で暗黒物質が暗黒エネルギーへと崩壊することにより実効的重力結合が弱まり、結果として密度揺らぎの振幅が抑制される。これにより銀河等の直接観測から得られた小さな密度揺らぎの振幅を整合的に説明することが可能となり、密度揺らぎの振幅に関する不一致問題の解決へと繋がるということが解析的・数値的に示されている。

以上のように、本論文ではベクトル・テンソル理論に基づく暗黒エネルギー模型に関する包括的な研究を行っている。特に、最新の観測データを用いたモンテカルロシミュレーションから、ハッブルパラメータの不一致問題を解決しうる暗黒エネルギー模型が見出された点は意義深い。更に、暗黒成分間の相互作用が宇宙論的なダイナミクスと可観測量に与える影響を精査しており、運動量輸送型の相互作用をベクトル・テンソル理論に取り入れることで密度揺らぎの振幅に関する不一致問題を緩和しうる点は、将来の高精度な観測データを用いて真に有効な暗黒エネルギー模型を選別していく上で重要な要素である。以上のことから、本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値があるものと認められる。