

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	間仁田侑典
論文題目	The Spin of Ultralight Dark Matter: From Theory to Observation (超軽量暗黒物質のスピン：理論から観測まで)		
(論文内容の要旨)			
本論文では、超軽量暗黒物質の理解を深めるために、スピン特性に焦点を当てた探査を行う。超軽量暗黒物質は整数スピンを持つボソン粒子で構成されており、スピン0およびスピン1の超軽量暗黒物質に関しては多くの研究がある。本論文では、超軽量暗黒物質の研究をスピン2の超軽量暗黒物質にまで拡張することを試みている。 第一章では超軽量暗黒物質のレビューを行い、超軽量暗黒物質が波動的性質を持つことや、初期宇宙における超軽量暗黒物質の生成機構を紹介している。 第二章では、発表論文をもとに、時空の異方性から生じるスピン2超軽量暗黒物質を生成する新しいメカニズムを提案をしている。このスピン2の超軽量暗黒物質モデルは、一般相対性理論を拡張した重力理論の一つである双重重力理論によって記述される。双重重力理論の枠組みにおいて、軸対称ビアンキタイプI宇宙で見つかった固定点となる宇宙論的な解を詳細に調査した。これらの固定点の安定性と分類の詳細な分析を行うことで、スピン2の超軽量暗黒物質の新しい生成シナリオを提案した。このシナリオでは、スピン2の超軽量暗黒物質が非等方的固定点から等方的固定点への遷移から生じる可能性があることが示された。 第三章では、干渉計型重力波検出器を用いた超軽量暗黒物質の探索において、スピン0、スピン1、スピン2 超軽量暗黒物質信号を区別する新しい方法を提案している。この方法は、複数の検出器間の相互相関分析を利用するものである。この分析で鍵となる量は、検出器の相対的な位置と方向を反映するOverlap reduction function(ORF)のスピン依存性である。検出器と宇宙を満たすダークマターの間に自然な相互作用を仮定したとき、スピン0およびスピン1 超軽量暗黒物質のORFパターンは、スピン2のものと大きく異なる。この違いは主に、スピン0およびスピン1 超軽量暗黒物質からの信号には有限飛行時間効果が重要になるが、スピン2超軽量暗黒物質からの信号では無視できるほど小さいという点に起因する。また、有限時間効果のORFを考慮すると、現在のスピン1の超軽量暗黒物質の結合定数の上限を見直す必要があることを見出し、これを指摘した。標準的な解析では、通常の重力波を解析する際に用いられるORFに基づいており、有限飛行時間効果を考慮していない。この効果を含めることで、パラメータ空間で許容される領域は以前考えられていたものより約30倍大きくなることがわかった。 要約すると、本論文は、質量や結合といった従来のパラメータに加えて、スピンという新しい次元を暗黒物質研究に導入し、暗黒物質の研究の範囲を広げる可能性を示したものである。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

宇宙は幅広いスケールに渡ってきわめて豊かな構造を持っている。近年の観測の進展によって、こうした宇宙の構造がどのように進化してきたかが高い精度で明らかになり、宇宙の極初期に急激な膨張があったとするインフレーション理論に基づいた「宇宙の標準モデル」によって非常によく説明されている。しかしながら、この標準モデルは現象論的なモデルであり、その背後に潜む物理は未だ解明されていない。実際、現在の宇宙の殆どを占めていると考えられている、ダークエネルギーとダークマターの正体を我々は知らない。また、インフレーションの源となる真空のエネルギーが何によるものかも分かっていない。豊富な精密観測データを誇る宇宙論の前には、ダークエネルギー・ダークマター・インフレーションという、3つの大きな謎が立ちまわっているのである。申請論文は、宇宙の3大謎の一つであるダークマター、その中でも超軽量ダークマターについての研究をまとめたもので、既に出版された1編の学術論文および1編のプレプリントに基づいている。

超軽量ダークマターのスピンは整数でなければならないことが知られており、スピン0およびスピン1の超軽量ダークマターの生成機構については多くの先行研究がある。そこで、*Phys. Rev. D* 107 (2023) 10, 104007では、スピン2の超軽量ダークマターの新しい生成機構を提唱した。時空の計量を2つ含む双重力理論において、時空の非等方性は、質量を持たないスピン2粒子と質量を持つスピン2粒子が凝縮したものに他ならない。そして、前者は通常の重力子であり、後者はスピン2の超軽量ダークマターの候補となる。本論文では、この系を表す力学系の、固定点およびその安定性の分類を系統的に行なった。そして、宇宙の発展に伴い、安定な固定点が、非等方性を含む固定点から等方的な固定点へ遷移する可能性が示された。このような遷移により、等方的な固定点の周りに質量を持つスピン2粒子が励起された状態が自然に実現され、したがって、私たちの住む一様等方宇宙においてスピン2の超軽量ダークマターを生成する新しい機構となる。

一方、プレプリント arXiv: 2310.10646 [hep-ph]では、超軽量ダークマターを重力波干渉計によって検出する試みにおいて、観測されるシグナルにダークマター粒子のスピンのように反映されるかを議論した。そして、複数の干渉計の間の相関を取ることで、スピン0、1、2の場合を観測的に判別できる可能性があることが示された。

以上のように、申請論文は、スピン2の超軽量ダークマターの理論的考察により新しい生成機構を提唱するだけでなく、超軽量ダークマターのスピンを観測的に判別できる可能性を議論することで、自ら提唱した理論モデルの観測的検証にまで踏み込んでいる。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、令和6年1月16日、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。

要旨公表可能日： 年 月 日以降