

学位申請論文公開講演会

日時：2026年2月2日 13:00~

申請者：乾 玲冬 (C研)

場所：物理会議室 (C207)

題目：Probing Dark Matter through Multi-Wavelength Gravitational Wave Observations: Signatures from Primordial Black Holes and Small-Mass Dark Matter Halos (多波長重力波観測による暗黒物質の探査：原始ブラックホールと小質量暗黒物質ハローからの兆候)

主論文の要旨

宇宙を構成するエネルギー成分のおよそ4分の1は、その正体が未解明の「暗黒物質」と呼ばれる成分で占められていることが、さまざまな観測から示されている。一方で、この暗黒物質(DM)は現在の素粒子標準理論では説明できない成分であり、その性質や起源を明らかにすることは、現代物理学における重要な課題となっている。

これまでに、地上での直接検出実験、加速器を用いた実験、さらに系外銀河からの放射を用いた暗黒物質の対消滅シグナルの探索が進められてきたが、素粒子起源の暗黒物質を示す明確な検出信号は報告されていない。これらの観測的制約は、原始ブラックホール(PBH)のような宇宙起源の暗黒物質の可能性や、新たな観測・解析手法による暗黒物質探索を検討する動機となっている。

この流れの中で申請者は、宇宙の暗黒成分を探る新しい手法である重力波に注目し、重力波の多波長観測に基づいた二つの独立的な取り組みからDMの起源を調査した。第一にDMとしてのPBHを考え、幅広いインフレーション模型に見られる対数型非ガウス性を持つ曲率ゆらぎが生成するPBHを調査した。申請者は、数値相対論とピーク理論に基づいてPBHの形成を調べ観測量であるスカラー誘起重力波(SIGW)信号を解析した。数値計算を通じて、PBHの形成に必要なゆらぎの大きさの閾値を同定し、閾値に最大値があることを示した。また、従来研究とは対照的に、揺らぎの初期条件によってPBHが全く生成されない領域が存在することを明らかにした。更に、PBHが暗黒物質の全量を占める場合に生成されるSIGW信号は、将来計画のレーザー干渉計宇宙アンテナ(LISA)で検出可能であることを示した。最後に、近年のパルサータイミングアレイ(PTA)による観測が報告したナノヘルツ帯の確率的重力波背景放射との整合性を調べた。本模型でPTAの観測を説明する場合、大部分のパラメータ領域においてPBHの過剰生成が無視できないことを示した。

第二の取り組みでは、PBHを含む低質量の暗黒物質ハローが重力レンズとして働く場合の重力波信号に着目し、波動効果が表れる低周波帯と光線近似が成り立つ高周波帯の重力波を組み合わせた観測手法を提案した。組み合わせることによりレンズ質量や重力波源との位置関係だけでなく、レンズ内部構造に関する情報も得られる。申請者は、宇宙重力波望遠鏡で連星の接近過程を観測し、第三世代地上望遠鏡で合体近傍を観測することを仮定し、特異等温球、コア付き等温球、NFW型といったいくつかのハローモデルのパラメータ推定精度を統計的に評価した。その結果、特にコア付き等温球モデルでは、レンズ質量、重力波源とレンズの相対位置、コア半径の推定誤差が、いずれも単独観測と比べて数十パーセント程度低減されることを示した。さらに、このような観測が可能な重力レンズイベントの発生頻度を見積もったところ、すべての質量範囲を含むレンズイベント数は年間でおおよそ100件と評価される一方、質量が $10^3 \sim 10^7$ 太陽質量の低質量ハローによるイベントは、年間で1件を大きく下回る値となることを示した。

本論文では、重力波観測を利用して暗黒物質の性質と起源を調べるための二つの理論的枠組みを提示した。第一の枠組みでは、原始ブラックホール暗黒物質モデルに対し、形成に必要なゆらぎの条件と、それに伴って生じるスカラー誘起重力波のスペクトルを求め、将来の宇宙重力波観測および現在のパルサータイミング観測との関係を検討した。第二の枠組みでは、低質量暗黒物質ハローによる重力レンズ効果を受けた重力波の多周波観測を想定し、レンズ質量や内部構造、重力波源との配置に対するパラメータ推定精度とレンズイベント率を評価した。これらの結果は、重力波を用いた暗黒物質探索に関連するパラメータ領域と観測条件を定量的に記述している。