

学位申請論文公開講演会

日時：2026 年 1 月 29 日(木) 10:00~

申請者：中島 光一朗 (C 研)

場所：物理会議室 (C207)

題目：Restoring Cosmic Initial Condition via Convolutional Neural Networks
(畳み込みニューラルネットワークによる宇宙初期密度ゆらぎの再構築)

主論文の要旨

天文観測技術の発展により、宇宙を構成する主要成分とその量は、一割程度の精度で測定できるようになってきた。一方、宇宙のエネルギー成分の 95% 程度を占める暗黒物質・暗黒エネルギーと呼ばれる成分は、その正体や性質が依然として明らかではない。

これらの暗黒成分の性質に迫るための標準的な手法として、初期宇宙で生成された密度揺らぎを、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) および宇宙大規模構造 (LSS) を組み合わせて異なる時代を観測し、その情報を引き出す方法が用いられている。従来は統計量を用いて両者が比較されてきたが、情報圧縮に伴う損失を避けるため、近年では空間分布そのものを直接比較する枠組みが検討されている。しかし、LSS の物質分布は重力崩壊の影響により単純な線形理論では記述できず、CMB との一对一の対応付けが困難となる。そのため、LSS に現れる重力非線形性を補正し、初期状態へと時間を巻き戻す「再構築」の手法が本質的な役割を担う。

本研究ではまず、解析的な再構築手法として、ラグランジュ的摂動論を検討した。ラグランジュ的摂動論は、従来のオイラー的摂動論では記述が困難である準線形スケールの記述に適している一方で、質量素片が初期の運動方向に進み続けることを前提としているため、重力進化後期のダイナミクスを表現できず、小スケールでは再構築精度が低下することが知られている。そこで、数値シミュレーションに基づく手法として、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた機械学習型の再構築に注目し、重力 N 体シミュレーションの終状態から初期密度場を推定する枠組みを採用した。

先行研究では、一辺 $76 h^{-1}\text{Mpc}$ の 3 次元密度分布を入力とし、その中心セルにおける初期密度を推定していたが、この長さスケールの選択について系統的な検討は行われていなかった。本研究では、入力として一辺 $32\sim 320 h^{-1}\text{Mpc}$ の 10 通りの長さスケールを用い、復元された密度ゆらぎのヒストグラムや二点相関に基づいた再構築精度の比較を行った。結果として一辺 $150\sim 200 h^{-1}\text{Mpc}$ 程度の入力で最も精度よく再構築できることを示した。さらに、CNN の受容野が局所的であるという特徴を補うため、「高解像度の小領域」と「粗い解像度の広域」を同時に入力する構成を導入し、局所構造と大域的な流れの両方の情報を同時に取り込むことを可能とした。その結果、一辺 $76 h^{-1}\text{Mpc}$ と $228 h^{-1}\text{Mpc}$ の二つのスケールを併用した場合には、単一スケール入力と比べて、 $k > 0.2 h \text{Mpc}^{-1}$ の領域における再構築精度が 1 割程度向上することを確認した。

本論文では、(i) 物質密度場の再構築において入力領域の空間スケールの選択が再構築性能に大きく影響すること、(ii) 異なるスケールの情報を同時に与えることで、畳み込みニューラルネットワークによる初期密度場の推定精度を高められることを示した。これらの結果は、将来の広域サーベイにおいて進化した構造から初期条件を復元する際には、観測条件や系統誤差の制約を踏まえた入力スケールの最適化と、複数スケール情報を組み込んだ解析手法の設計が有効であることを示している。