

観測的宇宙論への機械学習の導入事例 ——エミュレーション技術とすばる望遠鏡への応用



西道啓博

京都大学基礎物理学研究所
takahiro.nishimichi@yukawa.kyoto-u.ac.jp

宇宙開闢後わずか38万年後の姿を捉えた、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) は、観測可能な最大スケールにおける宇宙の姿を明らかにした。全天のあらゆる方向から届く、灼熱のビッグバン宇宙の黒体輻射の名残りは、到来方向に依存して 10^{-5} の微小な温度の違い(揺らぎ)を示しており、その詳細な分析が**ΛCDMモデル**と呼ばれる現代の標準宇宙モデルの確立に決定的な役割を果たした。ところが、最近になってCMBと近傍宇宙の観測との矛盾が取り沙汰されている。**ハッブルテンション**と呼ばれるこの問題は、ΛCDMモデルの綻びを示しているかもしれない。

CMB期から遙かな時を経て、微小な種揺らぎは重力により増幅され、やがて形作られる星、銀河、銀河団といった階層的な宇宙の大規模構造。宇宙初期の姿を2次元天球面上のスナップショットとして写し出したCMBに対して、大規模構造は非線形進化を経て作られた複雑なネットワーク状の3次元パターンであり、潜在的により多くの情報を有している。時間的にも距離スケール的にもCMBとは相補的な大規模構造は、ΛCDMモデルの妥当性をより厳密に検証する可能性を秘めている。

大規模構造の観測データから宇宙モデルやそこに内包される宇宙論パラメータを導くには、理論予言と観測データの比較に基づく統計推論が必要となる。様々なモデルとパラメータの組み合わせの中で、観測を最もよく再現するものは何かという問題である。これを高精度に行うには精巧な理論予言が必要となる。宇宙の構造形成シミュレーションは、計算コストの高さから長らく統計推論への応用が叶わなかった。近年

飛躍的に進展したデータ科学的方法論は、文字通り天文学的に大容量のデータを用いて人類が実証可能な最大スケールの現象を解き明かそうという宇宙論においても有用である。上記の問題は、いわゆる「シミュレーションに基づく推論」の範疇にあり、宇宙論、物理学だけに留まらず気象科学、生態学、疫学、分子動力学、工学、経済学などの諸分野に共通する大きなテーマとなっている。

シミュレーションに基づく宇宙論を可能とすべく、我々は大規模シミュレーションデータベースの構築と、**エミュレータ**の開発を目的とした「ダーククエスト計画」を2015年より推進している。2018年には初期のデータベースに基づく、ソフトウェア「ダークエミュレータ」の完成を見た。その後、模擬観測データを用いた種々のテストをクリアした後、このほどすばる望遠鏡が世界最高精度で測定した重力レンズ効果、およびスローン・デジタル・スカイ・サーベイが提供する現存する最大の銀河の3次元地図へと応用し、遂に宇宙論的帰結を導くことに成功した。計算コストの大きなシミュレータをエミュレータに置き換えることが、シミュレーションに基づく推論の具体的な実装例として機能することを実証した。

今後ますます増える観測データと、先鋭化するデータ科学的方法論の応用は、宇宙論の景色を大きく変えるかもしれない。すばるが、日本が、世界の宇宙論をリードするには、このような新しい手法が導き出した帰結を、どれだけ説得力を持った形で世に提示できるかが1つの鍵になるであろう。今後の展開からますます目が離せない。

用語解説

ΛCDMモデル:

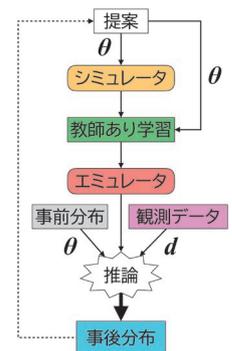
宇宙項 Λ と冷たいダークマター (Cold Dark Matter, CDM) を主成分とする「標準」宇宙モデル。それぞれ、宇宙の加速膨張、大規模構造形成や動力学を決める重力源としての役割を担う。

ハッブルテンション:

現在の宇宙の膨張速度を表すハッブル定数の推定の観測間の不一致。特に宇宙背景放射からの推定にはΛCDMモデルが仮定されているため、このモデルの破れを示唆する可能性がある。

エミュレータ:

計算コストの高い数値シミュレーションを低コストの統計モデルに置き換えること、およびこれを実現するソフトウェア。「シミュレーションに基づく統計推論」を実現する方法論の1つ。



エミュレータを中核に据えた統計推論モデル。 θ はパラメータ、 d はデータを表す。