



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Cosmological constraints on time-varying fundamental constant and extra component [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	戸田, 陽
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16247号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95314
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yo_Toda_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士(理 学) 氏 名 戸 田 陽

学 位 論 文 題 名

Cosmological constraints on time-varying fundamental constant and extra component
(物理定数の時間変化と余剰成分に関する宇宙観測制限)

宇宙論の標準モデルである Λ CDM モデルは、様々な赤方偏移での宇宙観測を説明することに成功しています。このモデルでは、宇宙定数 Λ によって説明されるダークエネルギーと、冷たい暗黒物質(CDM)を仮定しています。このモデルを用いることで、近傍観測によって証明された現在の宇宙の加速膨張だけでなく、宇宙背景放射(CMB)やビッグバン元素合成(BBN)といった初期宇宙の現象も説明することが可能です。

しかし、観測精度が向上するにつれ、遠方観測(高赤方偏移)と近傍観測(低赤方偏移)で得られるハッブル定数の間に不一致が生じることが明らかになりました。遠方観測では、 Λ CDM モデルを仮定した CMB 観測(Planck 衛星)が $H_0 = 67.36 \pm 0.54 \text{ km/s/Mpc}$ を報告し、バリオン(BAO)と BBN を組み合わせた観測でも $H_0 = 67.6 \pm 1.0 \text{ km/s/Mpc}$ が得られています。一方、近傍観測では、SH0ES チームによるケファイド変光星や Ia 型超新星の観測が $H_0 = 73.04 \pm 1.04 \text{ km/s/Mpc}$ を報告しており、この不一致は約 5σ に達しており、ハッブル定数問題(Hubble tension)として知られる深刻な問題となっています。

ハッブル定数問題を解決するために様々なアイデアが提案されています。その中でも、有望な緩和策として電子質量が時間変動するモデル(varying m_e model)が注目されています。このモデルでは、再結合期以前($z \gtrsim 1000$)において電子質量が現在の値 $m_{e0} = 511 \text{ keV}$ より数パーセント大きいと仮定することで、再結合期の音波地平線スケールが短縮され、より高い H_0 が推定されます。

本研究では、このモデルをビッグバン元素合成への適合性に着目して解析をおこないました。ヘリウムの質量分率は最近の観測で $Y_p = 0.2449 \pm 0.0040$ と報告され、重水素の存在量は $D/H = 2.527 \pm 0.030 \times 10^{-5}$ と測定されています。しかし、電子質量が現在の値より大きい場合、これらの軽元素の存在量が変化する可能性があります。例えば、電子質量の変化は中性子の崩壊率や弱い相互作用に影響を与え、それにより中性子と陽子の比率が変化し、BBN により合成される元素量が敏感に反応します。解析の結果、電子質量がビッグバン元素合成の時代においてやや小さい方が適合することを確認しました。これは、電子質量が大きいほどヘリウム質量分率が増加するためです。

一方、初期ダークエネルギー(early dark energy: EDE)モデルもハッブル定数問題の緩和法として広く研究されています。このモデルでは、再結合期以前に一時的なエネルギー密度を持つ EDE の影響により、音波地平線スケールが標準的な Λ CDM モデルより短縮されるため、より高い H_0 が推定されます。本研究では、EDE モデルと BBN の適合性も考慮し、追加の放射自由度や EDE のシナリオを評価・比較しました。解析の結果、EDE モデルは Λ CDM モデルと比較して BBN への適合性がやや低いこともわかりました。これは、推定されるバリオン非対称性の増加が重水素の存在量を減少させるためです。

もう一つの重要な宇宙論的測定であるバリオン音響振動(BAO)の最新結果が、Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)調査によって報告されました。我々は、新しい DESI データ、Planck による宇宙背景放射観測、従来の 6dF、MGS、DR12 からの BAO データ、および超新星光度曲線データを分析に組み込み、電子質量変動モデルおよび初期ダークエネルギーモデルに関する制約も提示しました。新しい DESI のバリオン音響振動観測データは、他のバリオン音響振動観測と比較してわずかに長い音波地平線を示しており、この2つのモデルが DESI バリオン音響振動観測データから好まれることに加え、より高いハッブル定数が示唆されることがわかりました。