

# CMB 温度揺らぎ観測から探る スカラーテンソル理論への制限と重力定数の進化

大場 淳平 (名古屋大学大学院 理学研究科)

## Abstract

修正重力理論は未知の暗黒エネルギーや暗黒物質の振る舞いを、一般相対性理論を拡張することで説明できる理論として期待されているが、修正重力理論のモデルは数多く存在し、現実に即したモデルを決定することは大変困難である。修正重力理論のモデルを決めるには様々な観測結果を用いてモデルに制限を与えることが必要不可欠である。そこで、修正重力理論と一般相対性理論とのずれをモデルパラメータで記述し、観測結果を用いて制限を与える。

本研究では、修正重力理論のモデルとしてスカラーテンソル理論 [1] に着目し、Planck による宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度揺らぎの観測データを用いて、モデルパラメータへの制限を行った。また、スカラーテンソル理論の大きな特徴として、観測される重力定数が時間発展することにも着目し、現在の重力定数と宇宙マイクロ波背景放射が放射された時代の重力定数との差についても制限を与える。モデルパラメータである  $\alpha_0$  に対して  $\alpha_0 < 1.4 \times 10^{-2}$  ( $1\sigma$ ) という制限を得て、CMB が放射された時期の重力定数については現在に比べて 10% ずれる可能性が示唆された。

## 1 Introduction

ビッグバン理論の帰結として存在する CMB の精密観測は、現代宇宙論を大きく進展させた。その結果として現在の宇宙の組成は、宇宙の加速膨張を引き起こす暗黒エネルギーが 68%、重力相互作用しない冷たい暗黒物質 (CDM) が 27%、通常物質 (バリオン) が 5% であると考えられている。しかし、宇宙の組成の大半を占めていると考えられる暗黒エネルギーや暗黒物質は未だにその正体がかかっておらず、世界中で盛んに研究されている。その一方で、未知の暗黒エネルギーや暗黒物質の振る舞いを、重力理論を修正することで理解しようとする立場もある。このような理論を修正重力理論という。修正重力理論は一般相対性理論を拡張することで、暗黒エネルギーを導入することなく現在の宇宙組成の観測結果を説明できる理論として期待されているが、修正重力理論のモデルは数多く存在し、現実に即したモデルを決定することは大変困難である。

修正重力理論のモデルを決めるには様々な観測結果を用いてモデルに制限を与えることが必要不可欠である。そこで、修正重力理論と一般相対性理論と

のずれをモデルパラメータを用いて記述し、観測結果を用いて制限を与える。

本研究では、修正重力理論のモデルとしてスカラーテンソル理論 [1] に着目し、Planck による CMB の温度揺らぎの観測データを用いて、モデルパラメータへの制限を行う。また、現在の重力定数と CMB が放射された時代の重力定数との差についても制限を与える。

第 2 章では本研究で扱うモデルを紹介し、第 3 章で解析方法と結果について述べ、第 4 章で結果について議論する。

## 2 Model

本研究で用いるスカラーテンソル理論の作用は、次のように表される。

$$S = \frac{1}{16\pi G_0} \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \phi R - \frac{\omega(\phi)}{\phi} (\Delta\phi)^2 \right] + S_m[\psi, g_{\mu\nu}], \quad (1)$$

ここで、 $G_0$  は現在観測されている重力定数であり、 $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$  は計量  $g_{\mu\nu}$  のもとでのリッチスカラー

を表す。 $S_m[\psi, g_{\mu\nu}]$  は物質の作用である。 $\omega(\phi)$  は無次元のカップリングパラメータであり、スカラー場  $\phi$  の関数となっている。 $\omega(\phi)$  は以下のように定義する。

$$2\omega(\phi) + 3 = \{\alpha_0^2 - \beta \ln(\phi/\phi_0)\}^{-1}, \quad (2)$$

ここで、 $\phi_0$  は現在の  $\phi$  を表し、 $\alpha_0$  と  $\beta$  は一般相対性理論からのずれを特徴づける定数パラメータである。平坦なフリードマン宇宙における背景場の方程式は、

$$\rho' = -3\frac{a'}{a}(\rho + p), \quad (3)$$

$$\left(\frac{a'}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G_0 \rho a^2}{3\phi} - \frac{a' \phi'}{a \phi} + \frac{\omega}{6} \left(\frac{\phi'}{\phi}\right)^2, \quad (4)$$

$$\phi'' + 2\frac{a'}{a}\phi' = \frac{1}{2\omega + 3} \left\{ 8\pi G_0 a^2(\rho - 3p) - \phi'^2 \frac{d\omega}{d\phi} \right\}, \quad (5)$$

のように書かれる。ここで、 $a$  はスケールファクターを表し、プライム ( $X'$ ) は共形時間での微分を表す。 $\rho$  と  $p$  はそれぞれ全エネルギー密度と圧力である。Cavendish タイプの実験を通して得られる有効的な重力定数は、 $\phi$  の関数として次のように表される。

$$G(\phi) = \frac{G_0}{\phi} \frac{2\omega(\phi) + 4}{2\omega(\phi) + 3}, \quad (6)$$

ここで、 $G_0$  は現在測定されている重力定数である。現在において  $G(\phi_0) = G_0$  となるという要請から、 $\phi_0$  は次のように求められる。

$$\phi_0 = \frac{2\omega_0 + 4}{2\omega_0 + 3} = 1 + \alpha_0^2, \quad (7)$$

ここで、 $\omega_0$  は現在におけるカップリングパラメータ  $\omega(\phi)$  である。

図 1 と図 2 はそれぞれ  $\Lambda$ CDM モデルのパラメータのもとでの  $\phi$  と  $G(\phi)/G_0$  の時間発展を表している。式 (5) の右辺第 1 項より、 $\phi$  は放射優勢期には変化せず、物質の影響が現れ始めると次第に変化し始め、現在において  $\phi_0$  の値へと収束していく。摂動の方程式系と揺らぎのパワースペクトルの変化は論文 [1] を参照。

### 3 Method & Results

本研究では CMB の角度パワースペクトルの計算に用いるボルツマンコードとして CLASS[2] を用いた。

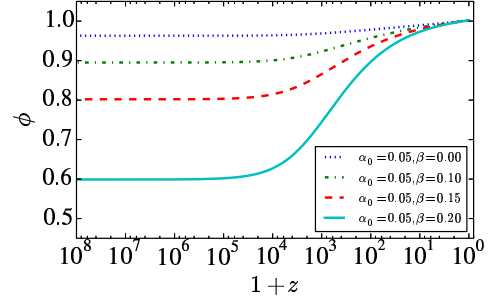


図 1: スカラー場  $\phi$  の時間発展

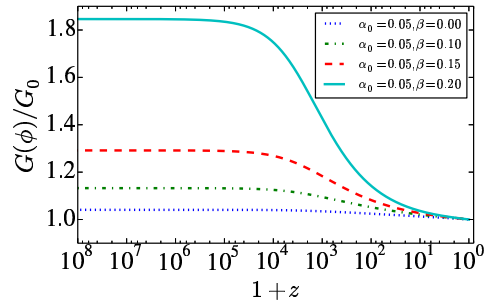


図 2:  $G(\phi)/G_0$  の時間発展

また、MCMC 法によるパラメータ解析には Monte Python[3] を用いた。宇宙論的パラメータとしては、現在のハッブルパラメータ ( $H_0$ )、現在のバリオンのエネルギー密度 ( $\Omega_{b0}$ )、現在の CDM のエネルギー密度 ( $\Omega_{c0}$ )、原始揺らぎの振幅 ( $A_s$ ) とスペクトル指数 ( $n_s$ )、再イオン化の時期の光学的深さ ( $\tau_{\text{reio}}$ ) をパラメータ解析に含め、モデルパラメータ  $\alpha_0$  と  $\beta$  に対する制限結果を得た (図 3)。使用したデータは Planck の温度揺らぎの観測結果である。

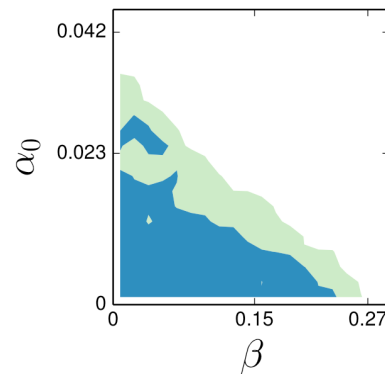


図 3:  $\alpha_0$ ,  $\beta$  への制限。濃い部分が 65%、薄い部分が 95% の信頼区間である。

## 4 Discussion

今回のパラメータ解析から  $\alpha_0$  に対する制限として  $\alpha_0 < 1.4 \times 10^{-2}$  ( $1\sigma$ ) を得た。また図 3 より見積もられる  $G(\phi)$  は、CMB が放射された時期では  $G_0$  に比べて 10% 程度大きくなる可能性が示唆された。今回は Planck のデータのみによる解析を行ったが、他の観測結果を複数用いたパラメータ解析も行っていく。

## 5 Conclusion

本研究では、修正重力理論のモデルとしてスカラーテンソル理論 [1] に着目し、Planck による CMB 温度揺らぎの観測データを用いて、モデルパラメータ  $\alpha_0, \beta$  への制限を行った。また、スカラーテンソル理論の大きな特徴として、観測される重力定数が時間発展することにも着目し、現在の重力定数と CMB が放射された時代の重力定数の変化についても議論した。制限結果として  $\alpha_0 < 1.4 \times 10^{-2}$  ( $1\sigma$ ) を得て、図 3 から CMB が放射された時期の  $G(\phi)$  について、 $G_0$  に比べて 10% 大きくなる可能性が示唆された。

## Reference

- [1] R. Nagata et al., Phys. Rev. D **66**, 103510 (2002).
- [2] D. Blas, J. Lesgourgues, and T. Tram, JCAP 1107, 034 (2011).
- [3] B. Audren, J. Lesgourgues, K. Benabed, and S. Prunet, JCAP 1302, 001 (2013).