

第1章 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) とは、宇宙の創生から 38 万年後に物質から脱結合した光子のことであり、我々が観測できる最古の光である。その発見はペンジアスとウィルソンによって 1965 年に行われ^[1]、その後 Cosmic Background Explorer (COBE) 衛星により強度の周波数依存性 (スペクトル) が測定された^[2]。測定されたスペクトルは温度が 2.725 K の黒体輻射のスペクトルと一致し (図 1.1)、CMB がほとんど一様等方な強度を持つことも確認された。これらの事実により CMB はビッグバン宇宙モデルを支持する強力な証拠となった。こうして現代の宇宙論の基礎を築き、発展させてきた CMB は、現在ではその偏光情報からインフレーション宇宙論の証拠を探ることができると期待されている。本章では、はじめに現在の標準的な宇宙モデルである Λ CDM モデルについて述べ、次いでインフレーション宇宙論について述べる。その後、CMB 偏光について述べる。

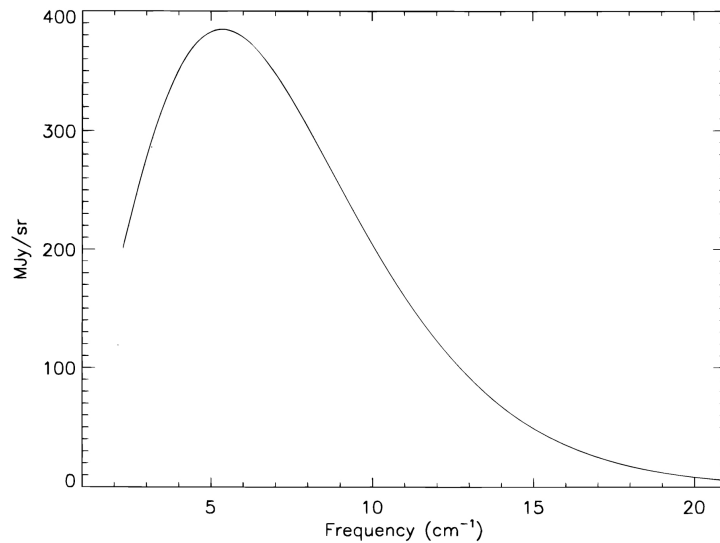


図 1.1: COBE 衛星による CMB のスペクトル測定値を黒体輻射のスペクトルで fitting した結果。

1.1 Λ CDM モデル

現在の標準的な宇宙モデルである Λ CDM モデルについて述べる。まず、Einstein 方程式は、計量テンソル $g_{\mu\nu}$ 、Einstein テンソル $G_{\mu\nu}$ とエネルギー運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ を用いて

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (1.1)$$

とかける。ここで、 G は重力定数、 Λ は宇宙定数である。また、自然単位系を採用した。一様等方な宇宙では、その計量はフリードマン・ルメートル・ロバートソン・ウォーカー計量

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right] \quad (1.2)$$

で記述される。ここで、 $a(t)$ はスケールファクター、 K は宇宙の曲率を表す。また、宇宙の物質が完全流体であることを仮定すると、エネルギー運動量テンソルを

$$T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -\rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

と表すことができる。ここで、 ρ はエネルギー密度、 P は圧力である。エネルギー運動量テンソルを用いてエネルギー保存則を考えると

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + P) = 0 \quad (1.4)$$

を得る。式 (1.2)、式 (1.3) を式 (1.1) に代入し、 $(0, 0)$ に注目すると

$$H^2 := \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{\Lambda}{3} - \frac{K}{a^2} \quad (1.5)$$

を得る。これをフリードマン方程式と呼ぶ。 $H := \dot{a}/a$ はハッブル定数である。エネルギー密度 ρ は、物質による寄与と放射による寄与大別することができる。各々のエネルギー密度 ρ_m 、 ρ_r はそれぞれ a^{-3} 、 a^{-4} に比例するため、フリードマン方程式は

$$H^2 = H_0^2 \left[\frac{\Omega_m}{a^3} + \frac{\Omega_r}{a^4} + \frac{\Omega_K}{a^2} + \Omega_\Lambda \right] \quad (1.6)$$

と書ける。ここで、 H_0 は現在のハッブル定数、 Ω_m 、 Ω_r 、 Ω_K 、 Ω_Λ はそれぞれ物質、放射、曲率、宇宙定数の密度パラメータであり

$$\Omega_m := \frac{8\pi G\rho_m}{3H_0^2}, \quad \Omega_r := \frac{8\pi G\rho_r}{3H_0^2}, \quad \Omega_K := \frac{-K}{H_0^2 a^2}, \quad \Omega_\Lambda := \frac{\Lambda}{3H_0^2} \quad (1.7)$$

と表される。これらの密度パラメータは

$$\Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda + \Omega_K = 1 \quad (1.8)$$

を満たすが、これまでの CMB の観測は $\Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda = 1$ という結果を示しているため、宇宙は平坦であると考えられている [?]。

Λ CDM モデルには、以下の 3 つの問題をもつ。

1. 地平線問題：CMB の温度揺らぎは天球面上のどの方向を見ても $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ と非常に小さい。これは因果関係を持たないはずの 2 点の温度が高い精度で一致していることを意味しており、 Λ CDM モデルはこの理由を説明できない。
2. 平坦性問題：これまでの観測によれば、現在の宇宙は曲率がほとんどゼロである。宇宙の曲率の密度パラメータ Ω_K は、時間発展とともに成長するため、宇宙初期に遡ると Ω_K は不自然なほどに小さくならない。
3. モノポール問題：大統一理論などの素粒子標準理論を超えた理論は、しばしば宇宙初期に磁気モノポールが生成されることを予言する。しかし、これまでの観測において磁気モノポールは発見されていない。

1.2 インフレーション宇宙論

前節にて述べた3つの問題の解決策として有力視されている理論が、宇宙初期において宇宙が指数関数的に膨張したとするインフレーション宇宙論である。この急激な膨張は因果律を持つ領域を急激に拡大し、空間を平坦にし、モノポールの濃度を薄めることで、地平線問題、平坦性問題、モノポール問題を解決することができる。

インフレーションは佐藤、カザナス、グースらによって提唱されたが、現在の

1.3 CMB 偏光モード

1.4 本論文の構成