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 [?]、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 [?]。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 ΛCDM 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。

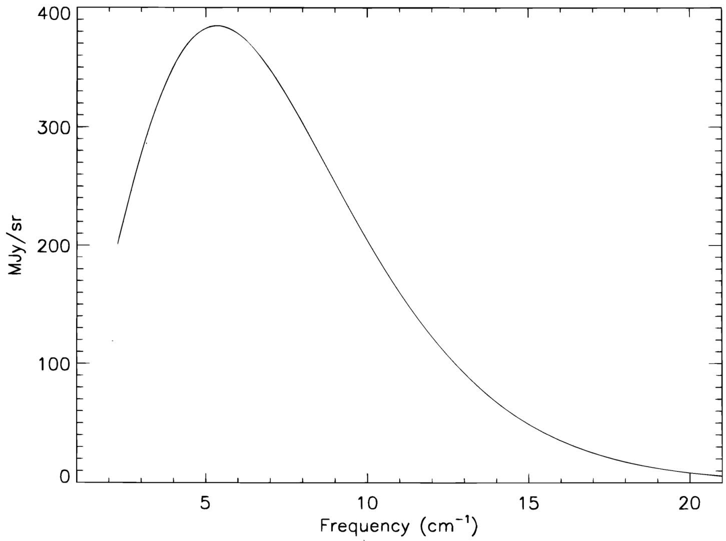

図 1.1: COBE 衛星による CMB のスペクトル測定値を黒体輻射のスペクトルで fitting した結果。

1.1　ΛCDM モデル

現在の標準的な宇宙モデルである ΛCDM 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

と書ける。ここで、H_0 は現在のハッブル定数、$\Omega_m, \Omega_r, \Omega_K, \Omega_\Lambda$ 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

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

と表される。これらの密度パラメータは

$$\Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda + \Omega_K = 1 \tag{1.8}$$

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 [?]。

ΛCDM モデルには、以下の 3 つの問題がある。

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、ΛCDM 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ければならない。

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インフレーション宇宙論である。インフレーション宇宙論は、宇宙初期において宇宙が指数関数的に膨張したとする理論であり、この急激な膨張によって、因果律を持つ領域を急激に拡大し、空間を限りなく平坦にし、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。

1.3 CMB 偏光モード

1.4 本論文の構成