

第1章 CMB 偏光観測

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^[7]、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^[7]。測定されたスペクトルは温度が 2.725 K の黒体放射のスペクトルと一致し (図 1.1)、CMB の強度が天球面上の各点においてわずかな違いはあれど、ほとんど一様等方であることも確認された。この事実はかつて宇宙が熱平衡状態にあったことを示し、宇宙が高温高密度の状態から膨張して現在に至る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 モデルの概要と抱える問題について述べ、次いでその問題の解決策としてインフレーションモデルについて述べる。その後、インフレーション由来が増幅する時空の歪みが、CMB の温度異方性と偏光パターンにどのような変化をもたらすかについて述べ、宇宙初期において B モード偏光パターンが原始重力波によって生じることを紹介する。最後に本論文の構成について述べる。

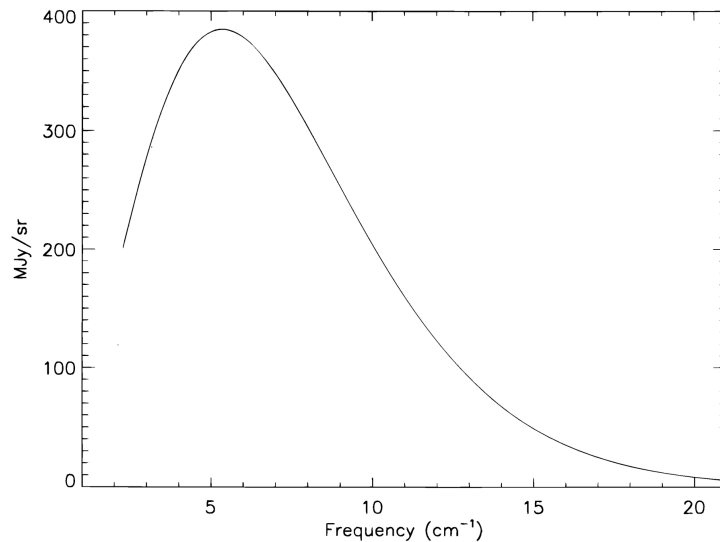


図 1.1: COBE 衛星による CMB のスペクトル測定値を黒体放射のスペクトルで fitting した結果。横軸は周波数を表し、縦軸は輝度を表す。

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、アインシュタイン方程式は、計量テンソル $g_{\mu\nu}$ 、アインシュタインテンソル $G_{\mu\nu}$ 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 (以下、FLRW 計量と呼ぶ)

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

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、 $(0, 0)$ 成分に注目すると

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

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とに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、 $\Omega_K = 0$ であり、宇宙は平坦であると考えられている [?]

Λ CDM モデルは、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、現在にいたるまで磁気モノポールは発見されていない。

1.2 インフレーションモデル

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モデルである。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。

インフレーションモデルは佐藤、グースらによって1981年に提唱された^{[7][8]}が、現在では多種多様なバリエーションを有する^[9]。ここでは、宇宙初期にインフラトンというスカラー場 ϕ によって引き起こされ、スローロール近似を課したインフレーションについて紹介する。

一様等方な宇宙のもとでのインフラトンの運動方程式は

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + c^2 \frac{\partial V}{\partial \phi} = 0 \quad (1.9)$$

と与えられる。 H はハッブル定数である。また、曲率 $K = 0$ のフリードマン方程式 (1.5) はインフラトンのエネルギー密度の寄与が主要であるとする

$$3H^2 M_{\text{pl}}^2 = \frac{1}{2c^2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad (1.10)$$

となる。 $M_{\text{pl}} = \sqrt{1/8\pi G}$ は換算プランク質量である。ここで、スローロール近似と呼ばれる、インフレーションが十分長い時間続くための近似

$$\left| \frac{\dot{\phi}^2}{V(\phi)} \right| \ll 1, \quad \left| \frac{\ddot{\phi}}{H\dot{\phi}} \right| \ll 1 \quad (1.11)$$

を課す。式 (1.9) と (1.10) から

$$H^2 = \frac{V(\phi)}{3M_{\text{pl}}^2} \quad (1.12)$$

$$\dot{H} = -\frac{\dot{\phi}}{2c^2 M_{\text{pl}}^2} \quad (1.13)$$

を得る。以上から、インフレーション中のスケール因子 a は

$$a \propto e^{\mathcal{N}} \quad (1.14)$$

$$\mathcal{N} := - \int_{t_f}^t H \, d\tilde{t} = - \frac{1}{M_{\text{pl}}^2} \int_{\phi_f}^{\phi} \frac{V}{\partial V / \partial \phi} \, d\tilde{\phi} \quad (1.15)$$

のように指数関数的に増大していく。ここで、 t はインフレーション中の時刻、 t_f はインフレーションが終わる時刻であり、 ϕ_f はインフレーションが終わる時刻での ϕ である。 \mathcal{N} は e-folding

数と呼ばれ、地平線問題・平坦性問題を解決するためには典型的に $50 < \mathcal{N} < 60$ 程度であればよいと考えられている。

インフレーションにおけるスケール因子の指数関数的増加は空間の指数関数的膨張を引き起こす。また、この膨張に伴い、時空の量子揺らぎを古典的なスケールに引き延ばす。具体的には、FLRW 計量 (1.2) をデカルト座標系で書き直した上で

$$ds^2 = -(1 + 2\Phi) dt^2 + a^2(1 - 2\Psi)(\delta_{ij} + h_{ij}) dx_i dx_j \quad (1.16)$$

といった揺らぎを与える。ここで、 Φ は重力ポテンシャル、 Ψ は曲率揺らぎ、 h_{ij} はテンソル揺らぎを表し、いずれも微量である。 h_{ij} は原始重力波として見なすことができ、 z 軸正の方向に進む重力波は

$$h_{ij} = \begin{pmatrix} h_+ & h_\times & 0 \\ h_\times & h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

と 2 つの基本モード (+ モードと \times モード) を用いて表すことができる。図 1.2 に + モードと \times モードが作る空間の歪みを示す。

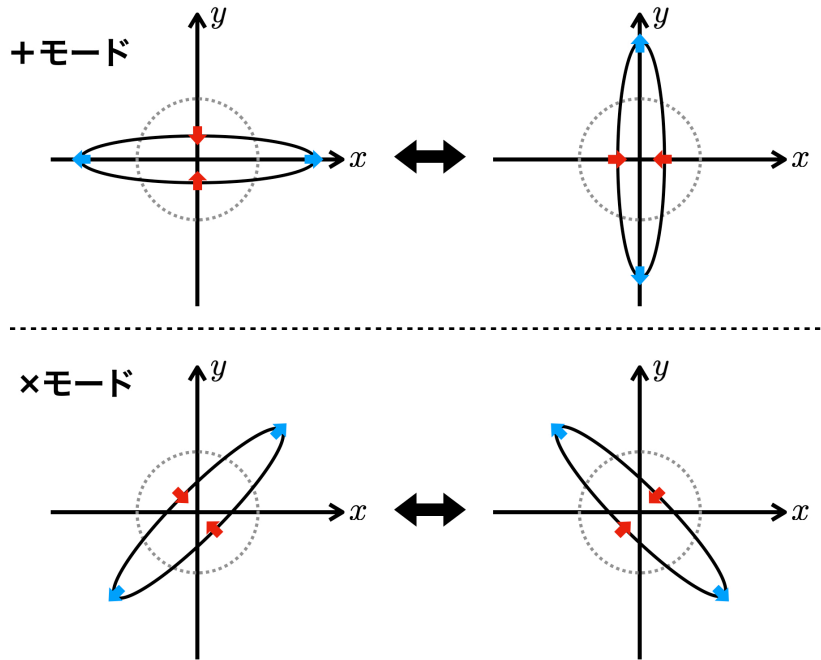


図 1.2: 重力波の + モード (上) と \times モード (下) が作る空間の歪み。歪みのない時空中での円 (点線) が、時空が歪むことで伸び縮みされ楕円 (実線) になっている。

1.3 CMB の温度異方性と偏光

インフレーションによって生じた時空の歪みは、CMB の温度に異方性を作る^[7]。式 (1.16) 中の Φ , Ψ はスカラー揺らぎと呼ばれる原始揺らぎに基づく温度の揺らぎを、 h_{ij} はテンソル揺らぎと呼ばれる原始揺らぎに基づく温度の揺らぎを作る。CMB の偏光に E モードと呼ばれる偏光パターンを、B モードと呼ばれる特有の偏光パターンを生む。本節では、はじめに CMB の温度異方性をどのように定式化するか述べ、過去の観測実験による結果を述べる。その後、温度異方性がどのような偏光パターンを生むかについて述べる。

1.3.1 CMB の温度異方性とパワースペクトル

天球面上の各点における CMB の温度 T に対して、温度揺らぎを $\Delta T = T - \bar{T}$ と定義する。 \bar{T} は平均温度である。この温度揺らぎ ΔT を、球面調和関数 $Y_{\ell m}$ で展開すると

$$\Delta T = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}^T Y_{\ell m} \quad (1.18)$$

となる。この展開係数 $a_{\ell m}^T$ を用いて、に渡って CMB パワースペクトル C_{ℓ}^{TT} を

$$C_{\ell}^{TT} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} (a_{\ell m}^T)^* a_{\ell m}^T \quad (1.19)$$

と書く。これは座標系によらないという点で優れた統計量となっている。また、 ℓ は天球を見込む立体角 $\Delta\Omega$ と対応づいており、おおよそ $\Delta\Omega \simeq 180^\circ/\ell$ と結びつく。

図 1.3 に Planck 衛星によって観測された CMB の温度異方性の全天マップを示す。また、図 1.4 に同じく Planck 衛星によって得られたパワースペクトルを示す [?]

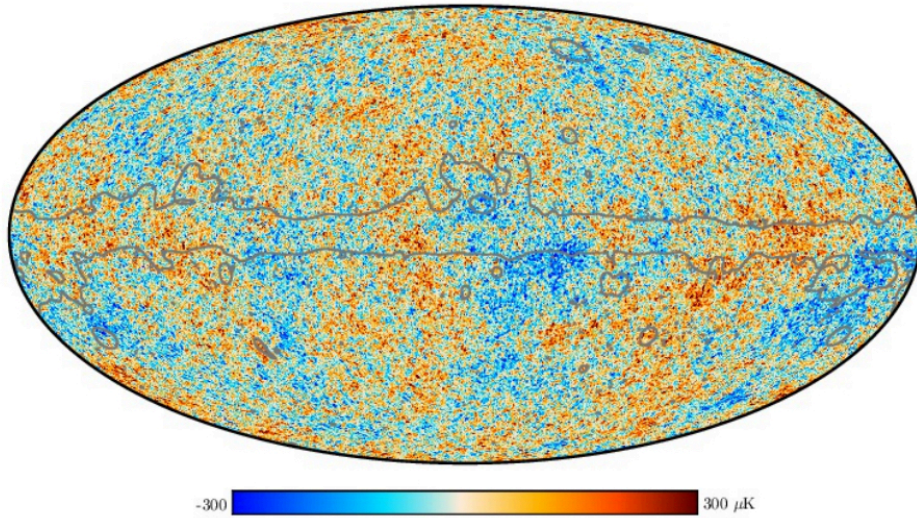


図 1.3: Planck 衛星によって得られた温度異方性の全天マップをモルワイデ図法で描いたもの [?]. 色の分布は平均温度との差を表しており、赤色が平均よりも高温な部分、青色が平均よりも低温な部分を表す。

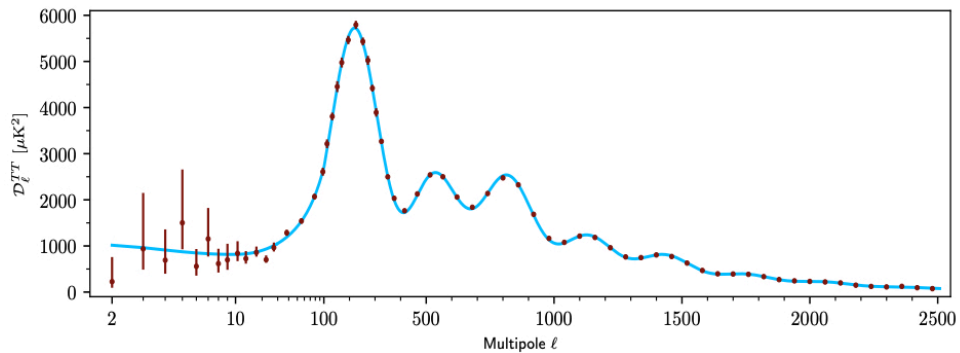


図 1.4: Planck 衛星によって得られたパワースペクトル [?]. 横軸に ℓ 、縦軸は $D_{\ell}^{TT} = \ell(\ell+1)C_{\ell}^{TT}/2\pi$ を示している。

1.3.2 四重極温度異方性による偏光の生成

スカラー揺らぎとテンソル揺らぎは、CMB に四重極温度異方性を生じさせ、四重極温度異方性はトムソン散乱の散乱角の異方性と相まって CMB に偏光を生じさせる。図 1.5 に四重極温度異方性を持つ空間と、トムソン散乱による偏光の生成メカニズムを示す。最終散乱面上に xy 平面にとり、最終散乱面から観測者に向かって z 軸をとる。 xy 平面上には x 軸上に高温領域が、 y 軸上に低温領域があるような四重極の温度異方性があるとする。このとき、 xy 平面上の原点にある電子は、周囲からやってくる光をトムソン散乱にしたがって観測者に向かって散乱する。トムソン散乱により観測者が偏光として観測できるのは、もともと xy 平面上に偏光方向を持っていた光の成分のみであり、高温領域の光は低温領域よりも強度が高いため、観測者が見る偏光方向は低温領域を繋げたような直線偏光となる。

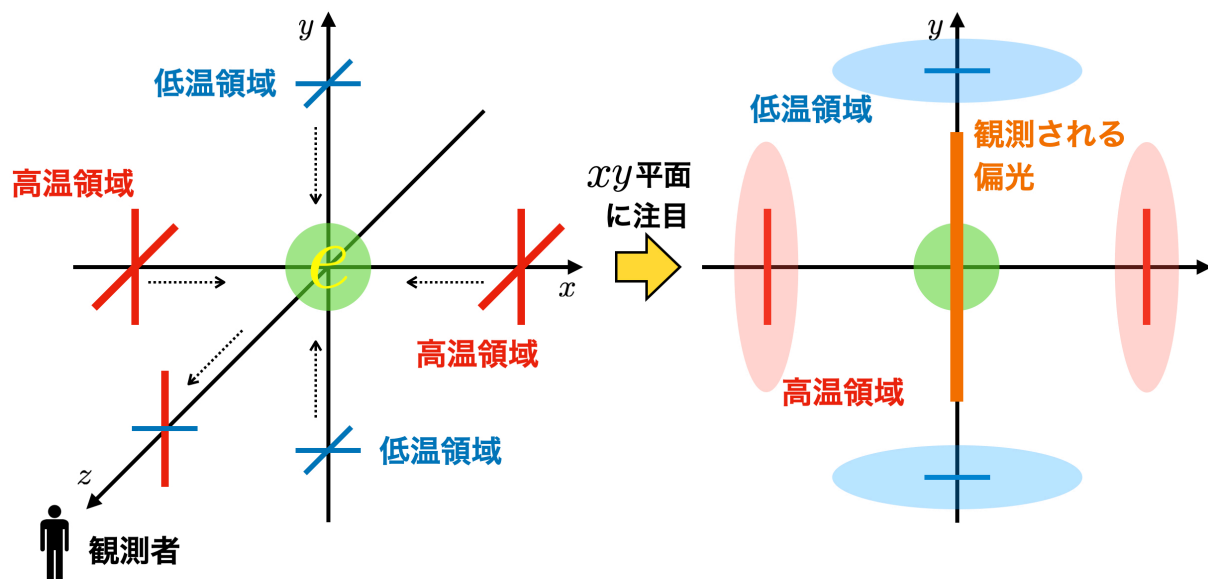


図 1.5: (左) 四重極に分布する高温領域と低温領域からくる光が電子によってトムソン散乱され観測者に届く様子。赤色、青色の直線はそれぞれ高温領域からやってくる光と、低温領域からやってくる光の直線偏光方向を示す。(右) 観測者から見た xy 平面の様子。橙色で描いた線が観測者が見る直線偏光である。橙色の線のみは見やすさのため過剰に大きく描いているため、その長さが強度と結びつかないことに注意。

1.3.3 スカラー揺らぎが作る偏光

スカラー揺らぎは音波のような疎密波として伝わっていると理解され、疎密波の進む方向に対して交互に高温領域と低温領域が並ぶこととなる。図 1.6 にスカラー揺らぎが生成する温度異方性により生まれる偏光パターンを示す。最終散乱面上の x, y 平面にて、 y 軸方向に疎密波が進み、高温領域と低温領域を交互に作っている。また、天頂からの角度が θ であるような天球面上の偏光を観測者が見ると、図 1.7 のようになる。

観測されるスカラー揺らぎの作る偏光パターンは図 1.8(左) のようになる。この偏光パターンは E モードとして知られ、空間対称なパターンを示す。

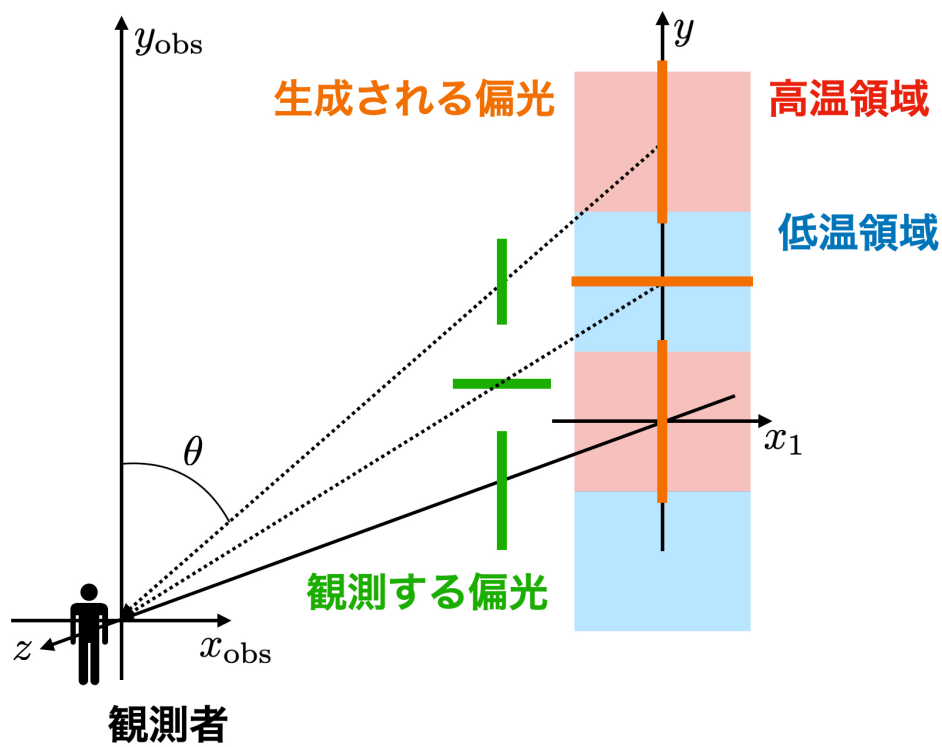


図 1.6: スカラー揺らぎが生成する温度異方性により生まれる偏光。最終散乱面上での交互に高温・低温を繰り返す温度分布が偏光を生成し、観測者に届けている。

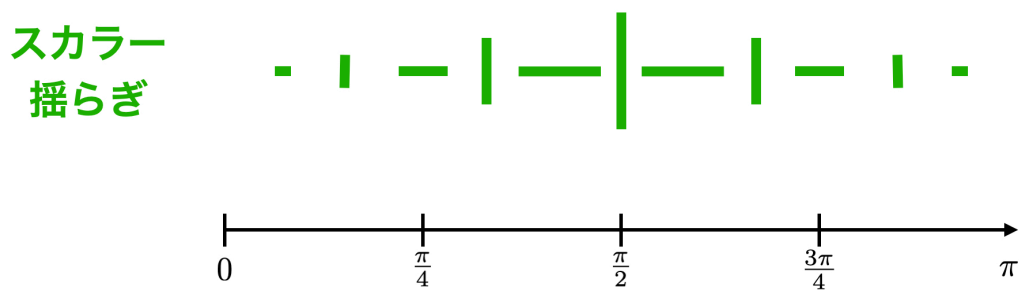


図 1.7: 天球面上の天頂からの角度 θ の地点を見たときのスカラー揺らぎによって生成された偏光。線の長さは偏光信号の強度を示している。

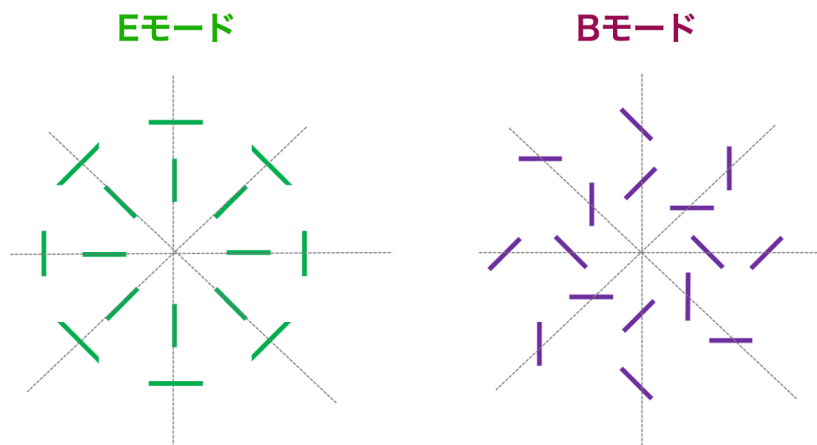


図 1.8: (左) スカラー揺らぎが作る E モード偏光パターン。空間対象な形をしている。(右) テンソル揺らぎが作る B モード偏光パターン。空間反対称な形をしている。

1.3.4 テンソル揺らぎが作る偏光

テンソル揺らぎ、すなわち原始重力波の伝搬に伴う四重極の温度異方性を考える。図 1.2 にて示した伝搬モードにおいて、収縮している部分は空間を縮め、光子の波長を短くするため温度が高くなり、膨張している部分は空間を広げ、光子の波長を長くするために温度が低くなる。図 1.9 に h_{\times} モードが y 軸正の方向に伝搬する際に生む偏光を示す。この偏光は重力波の進行方向に対して 45° だけ傾いている。観測者が方位角に 45° 、すなわち、 y_{obs} 軸まわりに 45° だけ回転し、もともと見ていた h_{\times} モードが作っていた信号を見ると、 h_{+} が作る偏光と同一のものが見える。図 1.10 に、 h_{\times} モードと h_{+} モードが天頂からの角度 θ の地点で作る偏光を示す。

このように、テンソル揺らぎによって作られる偏光は空間反対象なものである。図 1.8(右) に観測される偏光パターンを示す。これは B モードとして知られる。宇宙初期において、B モードは原始重力波によってのみ生成される。そのため、B モード偏光パターンの観測こそがインフレーションの直接的証拠となる。

1.3.5 テンソルスカラー比

テンソルスカラー比 r は、原始重力波の相対的な振幅を表す量である。 Φ, Ψ による空間のスカラー揺らぎと、 h_{ij} によるテンソル揺らぎの振幅をそれぞれ A_s, A_t としたとき、テンソルスカラー比 r を

$$r := \frac{A_s}{A_t} \quad (1.20)$$

と定義する。 r が大きいほどテンソル揺らぎはスカラー揺らぎに比べて大きいこととなる。 r が 0 でないことはテンソル揺らぎの存在の証明となり、インフレーションの証明となる。テンソル揺らぎは B モード偏光を引き起こすため、CMB 偏光観測実験により測定することができる。これまでの観測により、 $r < 0.032$ (95%信頼区間) を得ている [?]

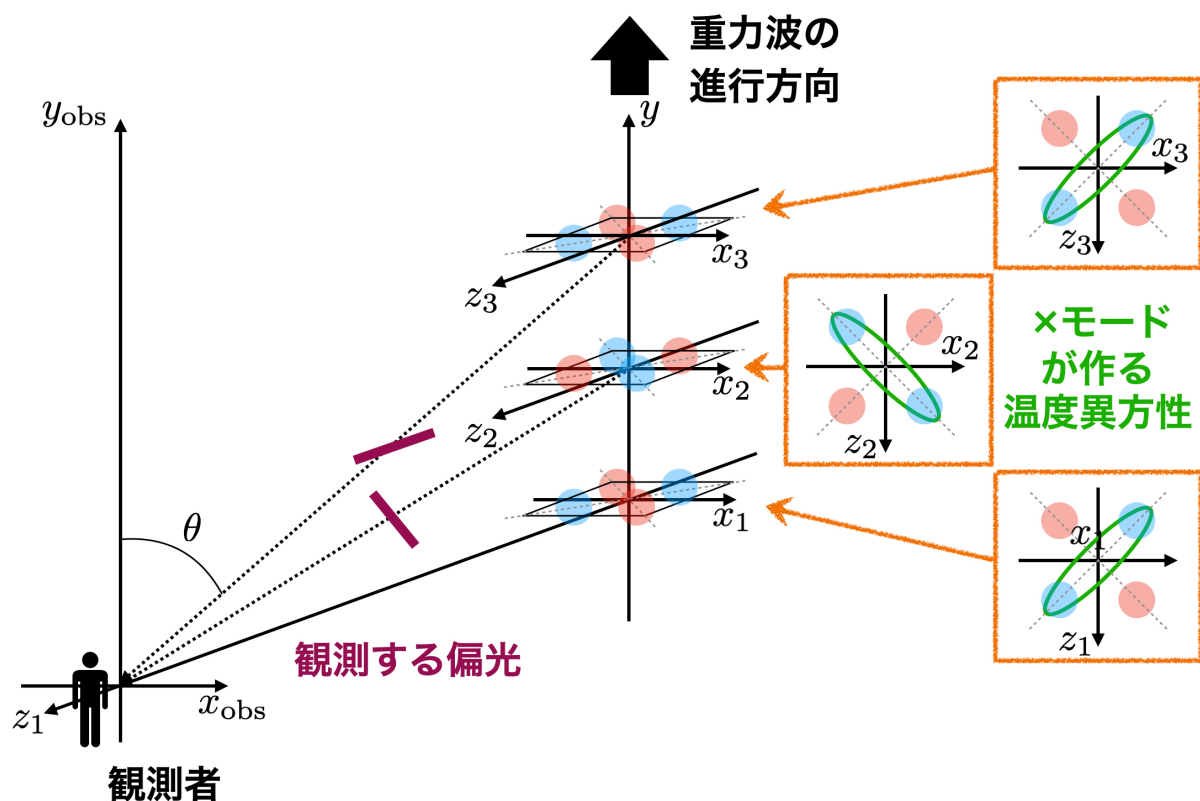


図 1.9: テンソル揺らぎのうち、 h_{\times} モードが作る偏光。観測者が方位角方向に 45° だけ回転することで、 h_{+} モードが作る偏光と同一のものが見える。

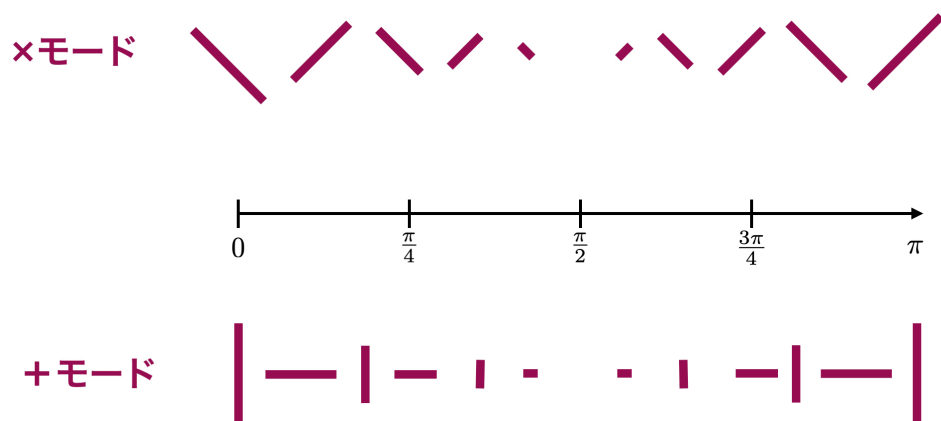


図 1.10: (上) 天球面上の天頂からの角度 θ の地点を見たときの h_{\times} モードが生成する偏光。(下) 天球面上の天頂からの角度 θ の地点を見たときの h_{+} モードが生成する偏光。これは、観測者が方位角方向に 45° だけ回転して h_{\times} モードが生成するを見たときのものと同じである。

1.4 本論文の構成

本論文では、続く 2 章で CMB 偏光観測実験 Simons Observatory の概要について述べ、原始重力波由来の B モード偏光観測に向けて検出器の応答偏光方向 (偏光角) を $\delta\theta < 0.1^\circ$ という精度で較正しなければならないことを説明する。3 章では $\delta\theta < 0.1^\circ$ での偏光角較正を実現するために使

用する、スパースイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置の概略について述べる。また、本較正装置が持つ系統誤差について述べ、その問題点を指摘する。4章では絶対角度較正、すなわち、検出器の偏光角が天球面上の座標でどの方向に対応するかを実現するために使用される重力参照計の評価を行い、その精度が要求を満たすものであることを述べる。5章では、系統誤差の要因の1つであるワイヤーのたわみを自動で評価する装置の開発について述べる。6章では5章にて開発した装置を用いて、実際に使用されるスパースイヤーグリッドのたわみを評価する。最後に7章にて、本論文のまとめと今後の展望について述べる。