

CMB における原始重力波起源の B-mode 偏光

林田 友利 (東北大学大学院 理学研究科 天文学専攻)

Abstract

宇宙マイクロ波背景放射 (以下 CMB) の偏光は初期宇宙の情報を含むものとして注目されている。特に 2 つある偏光モードの内、B モードはインフレーションが起こった証拠と考えられている。これは、インフレーション中のテンソルゆらぎから生成される原始重力波が B モード偏光を引き起こすと理論的に予測されているからだ。さらに、この偏光を観測することによって、インフレーションモデルに対する制限を得ることもできる。しかし CMB の B モード偏光は今のところ発見には至っていない (2015 年 7 月現在)。Planck (2015) によるとテンソル-スカラー比 $r < 0.11$ (95% CL) という上限が得られている。今回の発表では、まずこの B モード偏光がどのようにして生成されるかを簡単に説明する。そのあとで、インフレーションモデルに対する観測から得られている制限について、Planck (2015) を元にレビューする。

1 Introduction

以下、自然単位系を用いる。

1.1 初期重力波

メトリックを次のようにおく。

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \sum_{ij} [\delta_{ij} + h_{ij}(t, x^i)] dx^i dx^j \quad (1)$$

$a(t)$ はスケールファクター、 h_{ij} は摂動量だ。ここで h_{ij} は次の条件を持つ。

$$\sum_j \frac{\partial h_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad \sum_i h_{ii} = 0 \quad (2)$$

真空でのアインシュタイン方程式を計算すると、 h_{ij} の時間発展の式を得られる。

$$\ddot{h}_{ij} + 3\frac{\dot{a}}{a}h_{ij} - \frac{1}{a^2}\nabla^2 h_{ij} = 0 \quad (3)$$

これは波動方程式だ。この摂動量 h_{ij} は重力波として空間を伝搬する。

初期宇宙では、インフレーション中の量子ゆらぎからテンソルゆらぎが生成されると考えられている。テンソルゆらぎは、具体的には重力波として現れる。この初期宇宙に存在する重力波 (以下原始重力波と呼ぶ) は CMB の偏光を引き起こす。

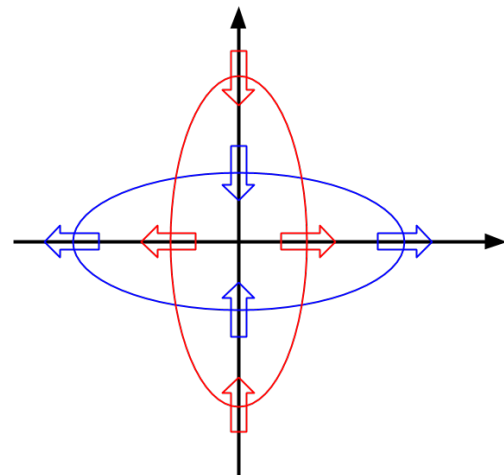


図 1: 波が進む方向と垂直な平面内での円の歪み方。楕円が伸び縮みを繰り返すように変形する。

1.2 偏光

重力波が空間を伝播するとき、空間は図 1 のように歪む。

CMB の偏光はトムソン散乱によって引き起こされる。トムソン散乱では光が電子によって散乱されると同時に偏光する。ゆらぎがない初期宇宙でトムソン散乱が起こる場合、光は電子に対してどの方向からも等しく一様に入射するので、結果的に偏光は相殺される。しかしゆらぎが存在する場合は静止した

電子の周りにエネルギーのむらが発生する。そのため入射する光のエネルギーが一様ではなくなるため、トムソン散乱された光には偏光が生じる (図 2)。

重力波は横波で、2つのモードを持っている。図 1 に示したものとこれを 45° 回転させたものだ。そして偏光にも E モードと B モードという 2つのモードがある。摂動量の一次の範囲では、E モード偏光はインフレーション中のスカラーゆらぎとテンソルゆらぎの両方から生成される。一方、B モード偏光はテンソルゆらぎのみによって生成される。よって、B モードの存在は初期重力波、ひいては重力波の原因であるインフレーションの存在自体を証明すると考えられている。

テンソルゆらぎとスカラーゆらぎのパワースペク

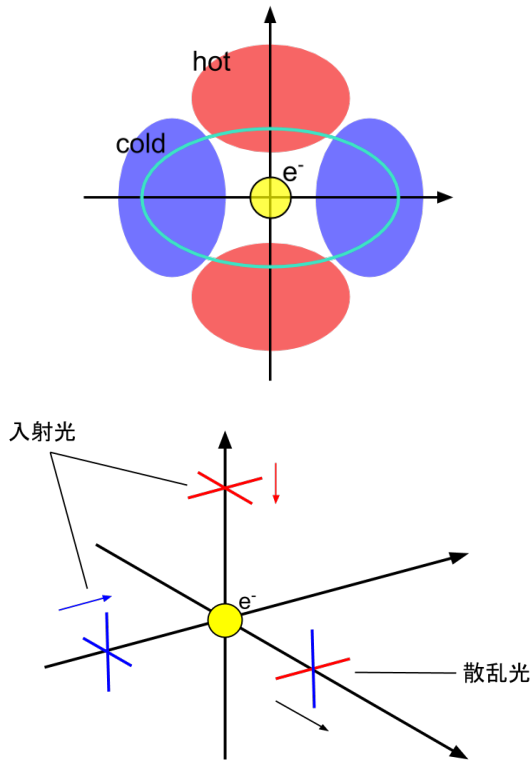


図 2: 重力波による偏光の発生。静止する電子の周囲が重力波によって歪むと、上図のように熱い領域と冷たい領域ができる。それぞれの領域からやってくる光子は異なるエネルギーを持つため、散乱された光は偏光する。

トル Δ_t, Δ_s の比を次のように定義する。

$$r \equiv \frac{\Delta_t^2}{\Delta_s^2} \quad (4)$$

ある時点でのインフレーションのエネルギースケールは r によって決めることができる。

$$V = \left(\frac{3\pi^2 A_s}{2} r \right)^{1/4} M_{\text{pl}} \quad (5)$$

ここで A_s はスカラーパワースペクトルの振幅、 M_{pl} はプランク質量である。

2 Observations and Result

原始重力波に由来する CMB の B モード偏光は今のところ発見されていない。

基本的に原始重力波起源の B モード偏光はラージスケール ($l \approx 80$) で観測されると考えられている (BICEP2 2014)。スモールスケールでは、主に重力レンズ効果による B モード偏光が現れる¹。

Planck(2015) の結果によると、 r の値の上限は次のように与えられている。

$$r < 0.10 \quad (95\% \text{ CL, } Planck \text{ TT} + \text{lowP}) \quad (6)$$

ここで基準スケール k_* は 0.002 Mpc^{-1} とした。この制限はスカラースペクトル指数

$$n_s \equiv d \ln \frac{\Delta_s^2}{d \ln k + 1} \quad (7)$$

のスケール依存性を考えると、緩和される。

$$r < 0.18 \quad (95\% \text{ CL, } Planck \text{ TT} + \text{lowP}) \quad (8)$$

$$\frac{dn_s}{d \ln k} = -0.013^{+0.010}_{-0.009} \quad (65\% \text{ CL, } Planck \text{ TT} + \text{lowP}) \quad (9)$$

3 Discussion and Conclusion

2 の結果をふまえて、インフレーションのエネルギースケールについて考える。単一スカラー場をも

¹CMB の E モード偏光は、重力レンズ効果によって B モード偏光に歪められる。

つスローロールインフレーションモデルを仮定すると、基準スケール k_* がハッブルホライズンを出るときのエネルギースケールが次のように求まる。

$$V = (1.88 \times 10^{16} \text{GeV}) \left(\frac{r}{0.10} \right)^{1/4} \quad (10)$$

この結果から、インフレーション中のハッブルパラメータが $H_*/M_{\text{pl}} < 3.6 \times 10^{-5}$ (95% CL, *Planck* TT + lowP) という上限が与えられる (*Planck* 2015)。

図 3 では観測から得られた r と n_s の値と、インフレーションモデルとを比較している。これを見ると、 $V \propto \phi^2$ や natural inflation などのモデルは観測結果と一致していないことがわかる。

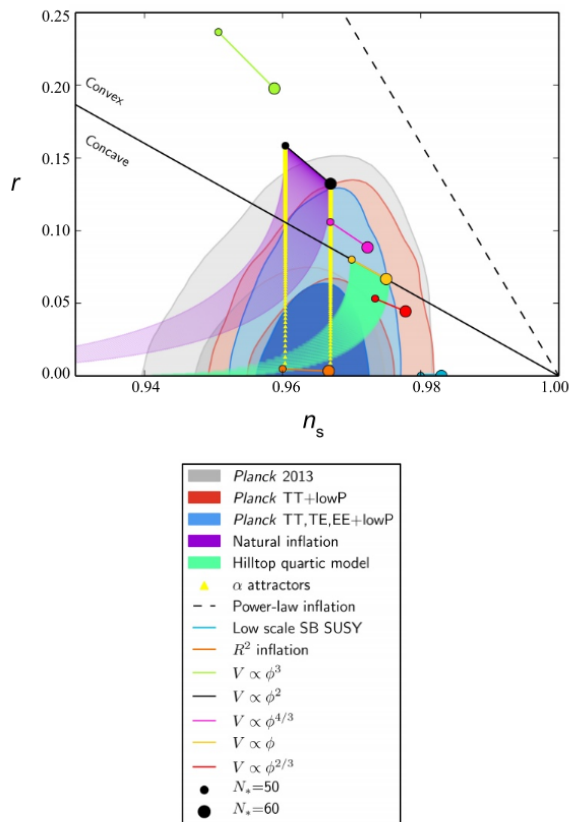


図 3: r と n_s の観測結果とインフレーションモデルの比較. (*Planck* 2015)(一部修正)

前節で述べたように、今のところ CMB の B モード偏光は発見されていない。観測される B モード偏光には、銀河中の電子によるシンクロトロン放射やダストの熱的放射由来の偏光も含まれている。原始

重力波起源の偏光を見るためには、これらの影響を取り除かなくてはならない。こうした前景放射の影響は $40'$ のスケールで 80-90GHz 帯で最も小さくなるとされている (*Planck* and BICEP2 2015)。これに近い波長帯で観測を行うことや、前景放射の影響を他の観測から見積もることで、より精度の高い観測が可能になる。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

P. Ade et al. (*Planck* Collaboration), 2015, arXiv:1502.02114.

P. Ade et al. (BICEP2, *Planck* Collaboration), 2015, Phys. Rev. Lett. 114, 101301 .

The BICEP2 Collaboration, 2014, Phys. Rev. Lett. 112, 241101.