

宇宙論的ベクトル型 2 次摂動論

嵯峨 承平 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

宇宙論的摂動論で取り扱うゆらぎは、スカラー、ベクトル、テンソル型摂動の各モードに分解される。線形摂動を考えた場合には、各モードは混ざり合わず、単純なインフレーションモデルにおいてはスカラーとテンソル型摂動が量子ゆらぎから生成されると考えられている。一方で、ベクトル型摂動は線形摂動では減衰モードしか存在しないために無視される。しかし、摂動を高次まで展開した際には各モードはもはや独立ではなく、2次ベクトル型摂動が自然と生成される。ベクトル型摂動は、宇宙論的な観測に興味深いシグナルを残すことが知られている。私は、この2次ベクトル型摂動が宇宙論の対象に与える影響について解析を行った。

1 導入

宇宙論的摂動論はゆらぎの種類に応じて、スカラー、ベクトル、テンソル型摂動と分離される。スカラーモードに関しては、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 観測をはじめとした種々の宇宙論的観測をうまく説明している。また、テンソルモードは標準的なインフレーションモデルから予言されており例えば CMB の B モード偏光から将来的に観測されうるモードである。しかしベクトルモードに関して、標準宇宙論の線形理論では減衰モードしか存在しないため無視される。

本研究は、標準宇宙論を2次まで展開した。2次まで展開することで、ベクトルモードが自然と出現する。このモードが残す宇宙論的シグナルは特徴的なものばかりである。以下で、それらのシグナルについていくつか紹介する。

2 宇宙磁場生成

宇宙磁場の起源は未だ解明されていない。その起源の候補となるのが2次摂動による磁場生成である。再結合前の光子・電子・陽子プラズマ中において、コンプトン散乱の電子と陽子にかかる力の違いから磁場が生成される (ハリソン機構)。ナイーブには、磁場を作るためには回転成分が必要であり、回転成分はベクトルモードに対応する。そのため、2次ベクトルモードから磁場が自然と生成される。以下がハリ

ソン機構によって生成される磁場の方程式である。

$$\frac{\partial \mathcal{B}^i}{\partial t} = \frac{4\sigma_T}{3e} \rho_\gamma^{(0)} a \epsilon^{ijk} \left[\delta v_{\gamma bj,k} - \delta_{\gamma,j} \delta v_{\gamma bk} - \frac{3}{4} (v_{bl} \Pi_{\gamma j}^l)_{,k} \right] \quad (1)$$

ここで、 $\delta v_{\gamma bj} = v_{\gamma j} - v_{bj}$ は光子とバリオンの相対速度、 δ_γ は光子の密度ゆらぎ、 $\Pi_{\gamma j}^l$ は光子の非等方圧項である。右辺角括弧内が磁場のソースとなる項で第一項からここでは、2次スリップ項、スリップ項、非等方圧項とそれぞれ呼ぶ。

先攻研究はスリップ項と非等方圧項のみの寄与が主に考慮されていた。本研究では2次ボルツマンコードを作成し、2次スリップ項の寄与を含めて磁場の完全な見積もりを行った。図1がその結果である。

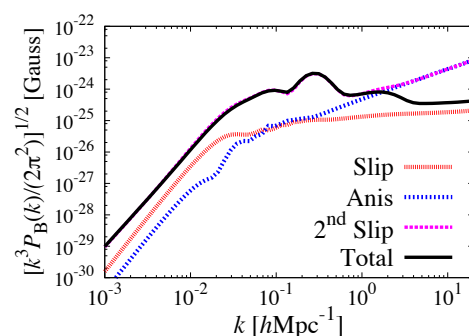


図 1: $1+z \simeq 1100$ における磁場のスペクトル。

以下が、主な結論である。

- 2次スリップ項が支配的だが、小スケールで非等方圧項とキャンセルを起こす。これは、輻射圧と輻射抵抗の釣り合いによって生じるものと

考えられる。

- 2次スリップ項に現れる、 $k \sim 0.2h\text{Mpc}^{-1}$ あたりの山は2次の方程式自身で引き起こされる高次独特の効果である。
- ハリソン機構で作られる磁場はおよそ 10^{-23}Gauss であり種磁場としてはやや小さい。しかし、磁気流体不安定性によってどの程度増幅されるのかにも依存するためその理解も必要である。
- この機構で作られた2次磁場は成功した線形摂動から導かれるもので必ず存在する。そのため、今後の磁場生成モデルはこの磁場を上回らないと埋もれてしまう。

3 弱い重力レンズ効果

弱い重力レンズ効果には大別して二つの観測が考えられる。一つは、コスミックシアと呼ばれるもので、銀河から放たれた光が大規模構造中の重力ポテンシャルによって曲げられ、形状が変形するというものである。もう一つが、CMB レンズングと呼ばれる、CMBの光が飛来してくる中で曲げられCMBのゆらぎのパターンを変化させるものである。パリティによって、コスミックシアのEモード、Bモード、CMB レンズングの勾配モード、回転モードとに分離される(図2)。面白い特徴として、摂動論のスカラー

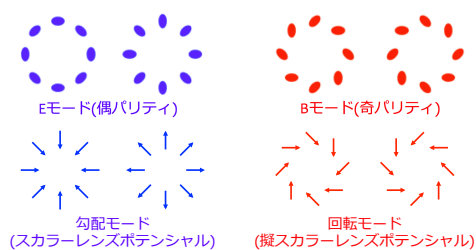


図 2: E、B モードと勾配、回転モードの模式図。

モードはEモードや勾配モードしか作らない。一方でベクトルモードやテンソルモードは主にBモードや回転モードを生成する。そのため、2次ベクトルモードや2次テンソルモードがBモード、回転モードにどの程度影響するのかを見積もることは、通常のスカラーモードでは存在しない寄与であるため非

常に重要である。本研究は、上記のBモード、回転モードに焦点を当てていくつかのモデルを比較した。

1. 原始重力波 (テンソルスカラー比 $r = 0.1$)
2. 2次テンソルモード (解析解)
3. 2次ベクトルモード (解析解)
4. 2次ベクトルモード (数値解)

図3がその結果である。

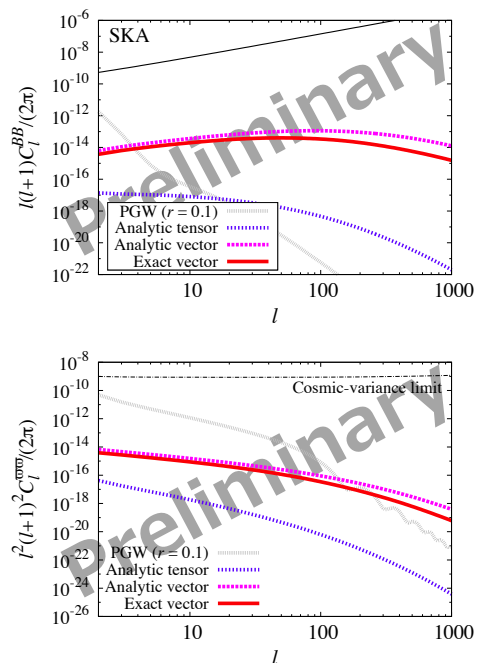


図 3: SKA を想定した B モードのシグナルとノイズ。CMB レンズングの回転モードのシグナルとコスミックバリエーションで決まるノイズ。

以下が、主な結論である。

- 2次ベクトルモードが小スケールで支配的になる一方で、2次テンソルモードはほとんど寄与しない。これは、2次テンソルモードが波であるのに対し、2次ベクトルモードは回転成分であるため散逸のしやすさの違いからくると考えられる。
- どのモデルの場合でもノイズに埋もれてしまうために観測自体困難であるということがわかる。ただ、2次ベクトルモードは原始重力波の $r = 0.1$ よりも大きなシグナルを生むため、他の宇宙論的観測で重要になる可能性もある。