

21cm Bispectrum を用いた EoR 探査

島袋隼士 (名古屋大学大学院理学研究科)

Abstract

Recombination 後、中性状態を保っていた水素は、 $z \sim 15$ で初期天体や銀河からの UV 光によって、再び電離すると考えられている。この時期のことを再電離期と呼び、観測によると、 $z \sim 7$ まで続くと思われている。再電離期を探る手段として、中性水素の微細構造由来の 21cm 線があり、その brightness temperature が観測量として期待されている。これまでは、brightness temperature の揺らぎを探る手法として、その power spectrum が一般的に用いられてきた。しかし、21cm 線の物理にはガウス分布に従う宇宙論的な揺らぎだけではなく、天体物理由来の非ガウス性な揺らぎも関係してくるので、より高次の統計量にも着目する必要がある。そこで我々は、21cm bispectrum に注目して計算を行った。

1 Introduction

インフレーションに始まり、ビッグバン元素合成を経て高温、高密度でプラズマ状態だった宇宙は自由電子が陽子に捉えられ、中性水素が形成された (recombination, $z \sim 1100$)。これ以降、 $z \sim 30$ までは天体の存在しない時代が続いていたが、 $z \sim 30$ で初期天体の形成が始まり、階層的構造形成が進み、銀河、銀河団と大規模な構造が形成が進み、現在の宇宙へと至る。この構造形成の過程の $z \sim 15$ で、再電離期 (Epoch of Reionization) と呼ばれる時代が始まる。これは、recombination 以後、中性状態で存在していた水素が、星や銀河からの紫外線 (UV) や X 線によって、電離が引き起こされる現象であり、 $z \sim 6$ まで続いたと考えられている。

現在、高赤方偏移のクェーサーやガンマ線バースト (GRB)、Lyman- α forest の観測によって、EoR 終期については観測が届きつつあるが、EoR 開始時期や、その期間については未だ分かっていない。しかし、現在、計画が進行中の Square Kilometer Array (SKA) では、 $z \sim 27$ まで観測する事が可能となり、EoR についての情報量が飛躍的に増えると期待されている。

再電離終盤を探る方法として、Lyman- α forest が使われている一方で、再電離序盤や中盤には、まだ中性水素が存在しているので、中性水素の微細構造による 21cm 線がこの時期の観測手段として期待されている。観測量としては、brightness temperature があるが、これまでは、brightness temperature の揺らぎを探る手法として、その power spectrum が一般的に用いられてきた。しかし、brightness temperature の揺らぎには、宇宙論から来るガウス統計に従う密度揺らぎの他にも、天体物理学的効果由来の非ガウス性な揺らぎも含まれているので、power spectrum より高次の統計量にも着目する必要がある。そこで我々は、21cm bispectrum に注目して計算を行った。

2 Observable

EoR を探る効果的な方法として、中性水素の微細構造由来の 21cm 線がある。観測量としては、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度 T_{CMB} との差で定義される brightness temperature が式 (1) で与えら

れる。ここで、brightness temperature は視線方向で計算される量である。

$$\begin{aligned} \delta T_b(\nu) &= \frac{T_S - T_{\text{CMB}}}{1+z} (1 - e^{-\tau_{\nu_0}}) \\ &\sim 27 x_{\text{HI}} (1 + \delta_{nl}) \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_s}\right) \left(\frac{H}{dv_r/dr + H}\right) \left(\frac{1+z}{10}\right)^{1/2} \left(\frac{0.15}{\Omega_m h^2}\right)^{1/2} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.023}\right) [\text{mK}] \end{aligned} \quad (1)$$

τ_{ν_0} は波長 21cm に相当する周波数 ν_0 ($=1.4\text{GHz}$) での光学的厚さ、 T_S は中性水素の spin temperature である。密度揺らぎ δ_{nl} 、銀河間ガス (IGM) の速度勾配 dv_r/dr は宇宙論的に決まる物理量であるが、中性水素率 x_{HI} 、spin temperature T_S は天体物理学的に決まる量であり、これらの量が EoR の情報を含んでいる。 $\delta T_b > 0$ のとき、CMB に対する輝線として観測され、 $\delta T_b < 0$ のときは CMB に対する吸収線として観測される。spin temperature は、ガスの力学的温度 T_K 、Lyman- α 色温度 T_α 、それぞれの結合定数 x_K, x_α を用いて次のように書き表す事ができる。

$$T_S^{-1} = \frac{T_{\text{CMB}}^{-1} + x_\alpha T_\alpha^{-1} + x_K T_K^{-1}}{1 + x_\alpha + x_K} \quad (2)$$

すなわち、spin temperature は中性水素ガスと以下の 3 つの相互作用によって決定される。

- (1) CMB 光子との相互作用
- (2) Lyman- α 光子との相互作用
- (3) 中性水素同士の衝突による相互作用

(2)、(3) による相互作用が、天体物理学的な効果によるものであり、spin temperature はこれらの影響を反映した物理量となっている。本研究では、Mesinger et al によって開発された semi-analytic コードの 21cmFAST を用いて brightness temperature の map を作成した。(Mesinger et al. (2011))

3 Bispectrum

Brightness temperature の Bispectrum の formalism について考える。CMB の温度揺らぎに対する bispectrum の formalism 同様 (Bartolo et al (2004))、brightness temperature に対する bispectrum は式 (3)

$$\langle \delta T_b(\mathbf{k}_1) \delta T_b(\mathbf{k}_2) \delta T_b(\mathbf{k}_3) \rangle = \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3) B(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3) \quad (3)$$

と表す事が出来る。Bispectrum を計算する際、どのような三角形を考える必要があるが、今回は (1)equilateral type(正三角形型) と (2)squeezed type (二等辺三角形) の二つを考えた。squeezed type では、三角形の一边を固定する。固定する辺を k_c として、 $k_c = 0.06, 0.6\text{Mpc}^{-1}$ の二通りで計算を行った。

4 Results

図 1 に equilateral type での $z=10, 20, 30$ における bispectrum を示した。また、図 2 では $z=20$ での equilateral type の bispectrum と squeezed type の bispectrum を比較した結果を示す。図 1 より、 $k \sim 0.1\text{Mpc}^{-1}$ に特徴的なピークが現れることが見て取れる (この特徴が何由来なのかは現在、議論中)。また、図 2 からは、large scale では equilateral type の bispectrum が dominant である一方で、small scale に行くと長波長側の情報を持つ ($k_c = 0.06\text{Mpc}^{-1}$) squeezed type の bispectrum からの signal が大きくなる事が分かる。

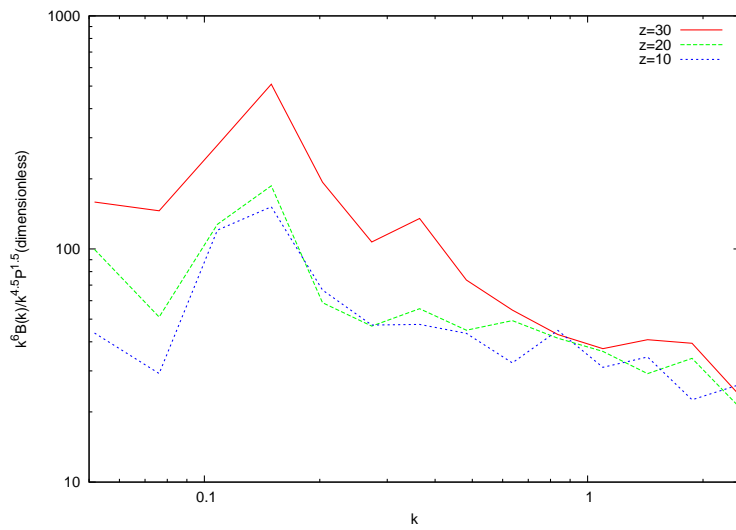


図 1: $z=10, 20, 30$ での equilateral type の bispectrum. $z=30$ (red), $z=20$ (green), $z=10$. 横軸は波数で縦軸は、bispectrum を power spectrum の 1.5 乗で規格化している。

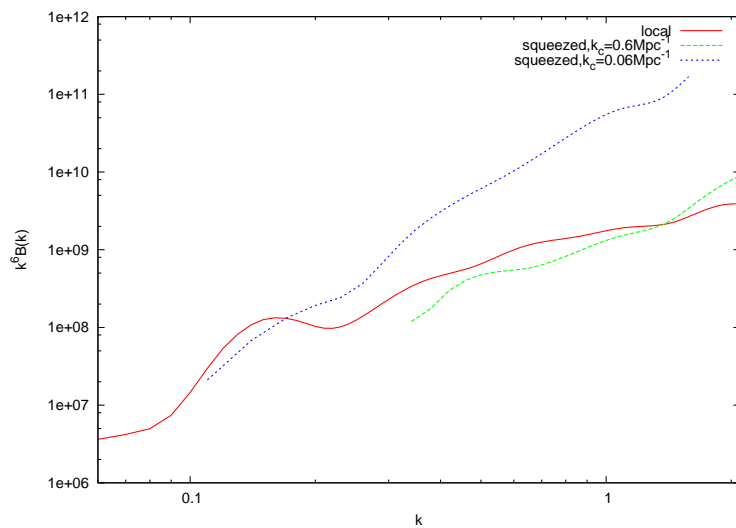


図 2: $z=20$ での equilateral type と squeezed type の bispectrum。equilateral(red), $k_c = 0.6 \text{Mpc}^{-1}$ (blue), $k_c = 0.06 \text{Mpc}^{-1}$ (green)

Reference

Mesinger, A., Furlanetto, S., Cen., R, 2011, MNRAS, 411, 955

N.Bartolo, E.Komatsu, S.Matarrese and A.Riotto, Phys.Rept. 402, 103 (2004)