

## 宇宙再電離と 21cm 線

吉浦 伸太郎 (熊本大学大学院 自然科学研究科)

### Abstract

宇宙晴れ上がりの際、宇宙は天体が全く存在しない暗黒時代を迎えた。やがて初期の天体が形成され始め、周囲の水素を電離していった。この時代を宇宙再電離期 (EoR) という。再電離期は十分な観測がされておらず、この時代の物理はよくわかっていない。再電離期観測の手段として、中性水素の 21cm 線が考えられている。観測される輝度温度には、宇宙論的な情報と天体物理的な成分が入っている。電波干渉計による観測で、私たちは輝度温度のパワースペクトルを得る事ができる。21cmFAST では、再電離期の輝度温度を近似を用いて計算する準数値シミュレーションである。今回、この 21cmFAST を用いて 21cm power spectrum を計算し、さらに、power spectrum を成分ごとに分解して各成分の寄与を調べた。

## 1 Introduction

宇宙晴れ上がりの際、宇宙には天体は存在せず、わずかな揺らぎを持った水素が一面に広がっていた。この時代を暗黒時代という。やがて、重力による構造形成が進み、初期の天体が形成される。形成されたばかりの頃は、天体からの放射によって天体の周囲の中性水素だけがイオン化される。時間が経つにつれ、銀河等の大規模な宇宙の構造が作られていく。また、イオン化される領域は徐々に広がって、最後には宇宙全体がイオン化される。この時代を宇宙再電離と呼ぶ。

宇宙再電離期は未だ観測が十分になされていない。再電離期の終わり ( $z \approx 7$ ) に関しては、これまでの観測で制限がなされてきた。しかし、それより High- $z$  の時代を高い解像度で観測するには、観測周波数帯と基線長の大きな望遠鏡が必要である。再電離期観測では電波干渉計が用いられるが、現在、SKA という大型電波望遠鏡による High- $z$  観測計画が進んでいる。

再電離期観測には中性水素の 21cm 線が用いられる。直接観測されるのは CMB との差から定義する輝度温度であり、電波干渉計による観測で私たちは輝度温度の power spectrum を得る。

## 2 EoR physics

中性水素の陽子と電子のもつスピンの向きが平行であるか反平行であるかによって、エネルギー準位が異なる。これを中性水素の超微細構造といい、エネルギー準位の高い方 (スピン平行 数密度  $n_1$ ) から低い方 (反平行 数密度  $n_0$ ) へ遷移が起きる時、21cm 線が放射される。この 2 つの準位の数密度の比から、スピン温度 ( $T_s$ ) が次のように定義される。

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0} \exp\left(-\frac{h\nu_{21}}{kT_s}\right) \quad (1)$$

ここで  $g_i$  は自由度、 $k$  はボルツマン定数、 $h$  はプランク定数、 $\nu_{21}$  は 21cm 線の周波数である。さらに、このスピン温度と CMB 温度の差から、輝度温度が次のように定義される。

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

ここで、 $T_{CMB}$  は CMB 温度、 $\tau_{\nu_0}$  は 21cm 線の optical depth である。式 (2) の中性度  $x_{HI}$  と  $T_s$  は天体物理の寄与を反映する。また、水素の密度ゆらぎ  $\delta_{nl}$  と  $dv_r/dr$  は宇宙論的に決まる。この 4 つの物理量が、21cm 線の power spectrum を決める重要な項である。

21cmFAST は、再電離期の宇宙を多くの近似を用いて計算する準数値シミュレーションである。近似を用いて流体シミュレーションに比べて計算コストを減らしている。21cmFAST では (2) 式をもとに輝度温度を計算する。考えたい領域をグリッドで区切り、区切られた各セルで計算する。いろいろな  $z$  で密度場、イオン化率、スピン温度、速度勾配についてそれぞれマップを計算する。そこから輝度温度の値を計算し、同様にマップを作る。

密度場については、Zel'Dovich 近似をもちいて計算し、セルごとに密度揺らぎの値を持たせる。この密度ゆらぎが、イオン化や  $T_S$  の計算に用いられる。

イオン化の計算は次のように行う。あるセルを中心にイオン化光子の mean free path 程度の半径の球を考える。その球の中で密度の大きいセルには天体があるとみなし、球全体の質量に対して、天体の質量が十分にあれば考えているセルはイオン化していると見なす。この操作を全セルについて行う。

スピン温度の計算は次の式を用いる。

$$T_S^{-1} = \frac{T_{CMB} + x T^{-1} + x_c T_K^{-1}}{1 + x_c + x} \quad (3)$$

ガスの温度  $T_K$  の計算は X-ray による加熱の効果を考え、時間発展の式を計算する。色温度  $T$  はガス温度で近似する。 $x_c$  は衝突係数、 $x$  は Ly- との結合定数である。

以上の計算をまとめて、輝度温度のマップを計算する。得られた輝度温度のマップから、21cm power spectrum を以下の定義で計算する。

$$\Delta_{21}^2(k, z) = \frac{k^3}{2\pi V} \delta \bar{T}_b(z)^2 \langle |\delta_{21}(k, z)|^2 \rangle_k \quad (4)$$

ただし輝度温度のゆらぎを次のように定義する。

$$\delta_{21}(\mathbf{x}, z) \equiv \frac{\delta T_b(\mathbf{x}, z)}{\delta \bar{T}_b(z)} - 1 \quad (5)$$

さらに今回、私たちは power spectrum を各成分の揺らぎで分解し、成分ごとの寄与を調べた。まず、輝度温度を次のように分解する。

$$\begin{aligned} \delta_b(\mathbf{x}, z) &= \delta \bar{T}_b(1 + \delta_{xH}(\mathbf{x}, z)) \\ &\quad \times (1 + \delta_{nl}(\mathbf{x}, z))(1 + \delta_A(\mathbf{x}, z)) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\delta_i$  は各成分のゆらぎである。添字の b は輝度温度、xH は中性率、nl は密度ゆらぎ、A は  $1 -$

$T_{CMB}/T_S$  である。これを用いて power spectrum は以下のように分解できる。

$$\begin{aligned} P_{21} &= (\delta \bar{T}_b)^2 [P_{\delta_{nl}\delta_{nl}} + P_{\delta_{xH}\delta_{xH}} + P_{\delta_A\delta_A} \\ &\quad + 2(P_{\delta_{nl}\delta_{xH}} + P_{\delta_{nl}\delta_A} + P_{\delta_{xH}\delta_A}) \\ &\quad + \text{higher-order}] \end{aligned} \quad (7)$$

21cmFAST で生成される各成分のマップを用いて、各項を計算した。

### 3 Results and Discussion

図 4 は輝度温度、密度、中性率、スピン温度についての  $z=10$  でのマップである。縦と横の数値は距離で、単位は Mpc である。図 1 の赤い部分が密度の大きいところであり、そこで主に天体が形成されている。図 3 を見ると、密度の大きかったところでスピン温度も大きくなっている事が分かる。さらに、図 2 を見れば、密度の大きかったところを中心にその周囲がイオン化されていて、バブルが形成されている事が分かる。これらのマップから形成されるのが図 4 の輝度温度のマップである。

図 5 は 21cmFAST を用いて計算した  $z=10$  の power spectrum である。 $k = 0.1(Mpc^{-1})$  付近で盛り上がりがあるのは、典型的なイオン化バブルのサイズに対応している。full は 21cmFAST で計算した power spectrum であり、xH と delta は中性度、密度ゆらぎについての自己相関からなる power spectrum、delta, xH は相互相関、total は式 (7) の higher-order を除いたものである。

図 5 を見ると、power spectrum はイオン化率の振る舞いが元になっているように見える。これはイオン化がある程度進んでいるためである。

ただし、total と full にはズレがある。total のグラフは線形の項しか計算していない。そのため、full の power spectrum との違いは非線形項の寄与であると考えられる。また、この時代ではスピン温度の揺らぎの寄与はかなり小さく、無視できる。

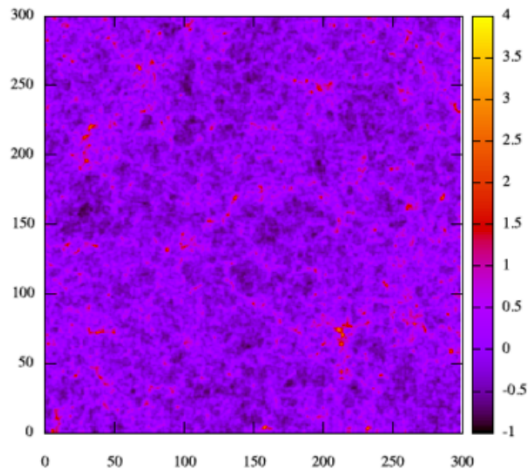


図 1: density fluctuation ( $z=10$ )

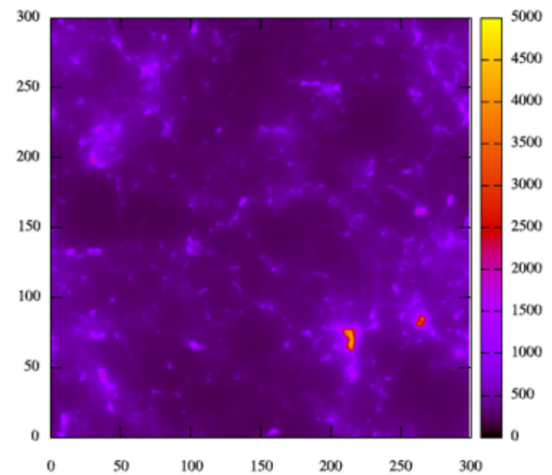


図 3: spin temperature[K] ( $z=10$ )

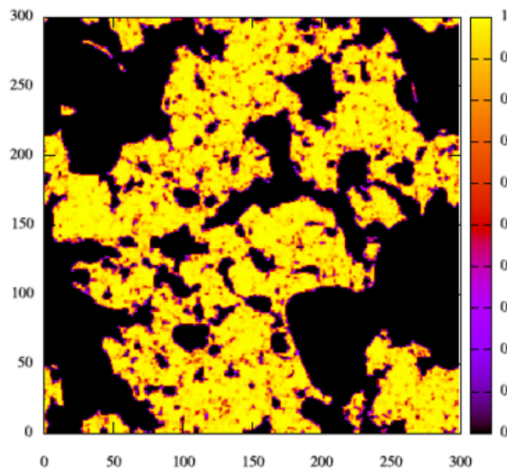


図 2: neutral fraction ( $z=10$ )

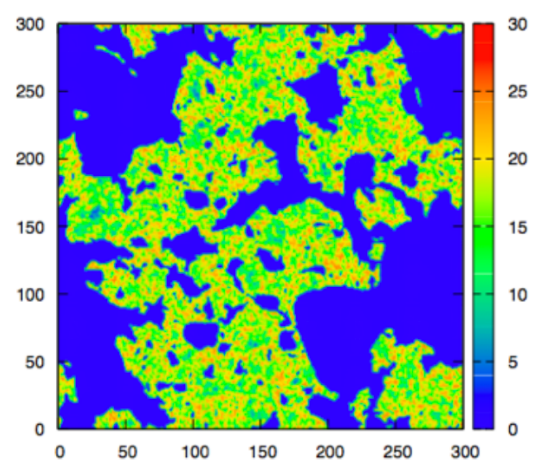


図 4: brightness temperature[mK] ( $z=10$ )

## 4 Conclusion

21cmFAST は以上のように再電離期の宇宙のマップや power spectrum を計算できる。21cmFAST ではさらに、天体から放射されるイオン化光子の量のような天体物理的パラメータを変化させ、様々なモデルで計算する事もできる。ただし、本来考慮すべき recombination や feedback の効果などが考えられていない。今後の課題として、より正確でより速い準数値シミュレーションを開発していく必要がある。

イオン化が進んだ時代の power spectrum はイオン化率についての非線形な効果が効いている。より高

次の項の寄与がどのようになっているのか調べる必要がある。

## Reference

- Mesinger, A., Furlanetto, S., & Cen, R. 2011, MNRAS, 411, 955
- Pritchard, J. R., & Loeb, A. 2012, Reports on Progress in Physics, 75, 086901

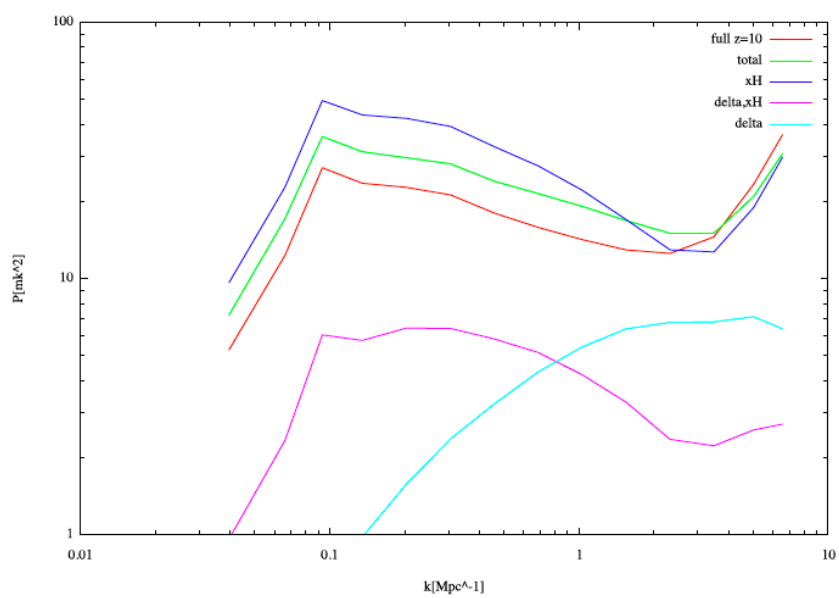


図 5: 21cm power spectrum ( $z=10$ )