

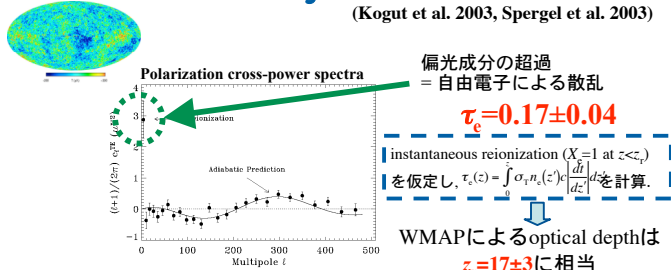
早期宇宙再電離時期における紫外線放射の強度進化

廣居 久美子, 梅村 雅之, 中本 泰史
(筑波大学)

WMAP衛星によるCMBの偏光観測により、宇宙再電離はかなり早期 ($z \sim 17$) に起こったことが示唆された。そこで我々は、早期宇宙再電離を実現するために必要な紫外線放射強度を評価するため、6次元輻射輸送計算による宇宙再電離過程のシミュレーションを行った。その結果、早期再電離を実現するためには $z > 14$ において、 $z \approx 4$ と同程度かそれ以上の紫外線放射強度が必要とされることが明らかになった。

1 Observation by WMAP

(Kogut et al. 2003, Spergel et al. 2003)



WMAPによる optical depth は $\tau_e = 17 \pm 3$ に相当
宇宙再電離がかなり早期に起こったことを示唆

本研究では早期宇宙再電離時期に必要なとされる紫外線放射強度を評価することを目的とする。

2 Models and Methods

Λ CDM cosmology を仮定 ($\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7, \Omega_b h^2 = 0.02, h = 0.7$).

各赤方偏移における非一様密度場を Truncated Zel'dovich 近似により生成。

紫外線背景放射のスペクトルとして以下を仮定
 $I_0 = I_{21} 10^{-21} (\nu_L/\nu)^\alpha \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1} \text{ str}^{-1}$
今回の計算では $\alpha = 1$
(ν_L : Lyman limit 振動数)

6次元輻射輸送方程式を解き各赤方偏移における電離構造を計算。電離平衡を仮定し電離度を計算。

[The simulation box has a comoving length of $L = 8 \text{ Mpc}$.
We use 64^3 grids for space, 64^2 grids for directions.

3 Result (1) - Evolution of Ionization Structure -

電離構造の計算結果例 ($z = 12$ から $z = 4$, $I_{21} = 0.1$ を仮定した結果の断面図) を右図に示す。 $z = 12$ において、自己遮蔽効果のために中心部分で中性水素の割合が高くなっている。

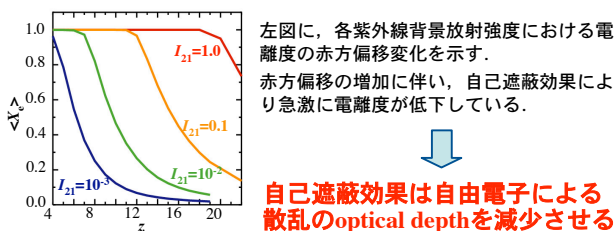
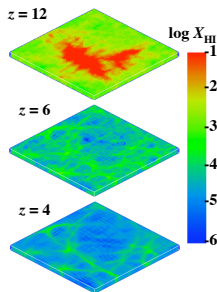
自己遮蔽効果が卓越する水素数密度の critical density (for 10^4 K gas),

$$n_{\text{crit}} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3} (M/10^{12} M_{\text{sun}})^{-1/5} (I_{21}/\alpha)^{3/5}$$

(Tajiri & Umemura 1998)

$\langle n_{\text{H}}(z) \rangle = n_{\text{crit}}$ の条件より自己遮蔽効果が卓越する赤方偏移は次式で与えられる,

$$1 + z_{\text{shield}} \approx 22 (L/8 \text{ Mpc})^{-1/5} (I_{21}/\alpha)^{1/5}$$



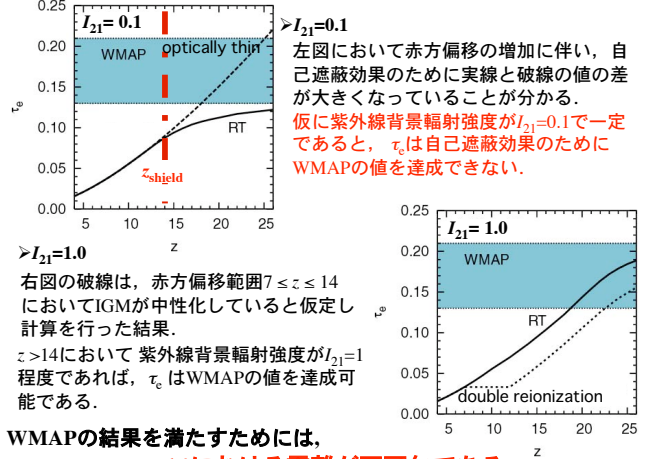
自己遮蔽効果は自由電子による散乱の optical depth を減少させる。

4 Result (2) - The Electron Optical Depth -

輻射輸送計算によって得られた電離構造を用いて、自由電子による散乱の optical depth を次式により計算。

$$\tau_e(z) = \int_0^z \sigma_T n_e(z') c \left| \frac{dt}{dz'} \right| dz'$$

$I_{21} = 0.1$ と $I_{21} = 1.0$ を仮定した計算結果について以下に図示する。



左図において赤方偏移の増加に伴い、自己遮蔽効果のために実線と破線の値の差が大きくなっていることが分かる。
仮に紫外線背景放射強度が $I_{21} = 0.1$ で一定であると、 τ_e は自己遮蔽効果のために WMAP の値を達成できない。

$I_{21} = 1.0$

右図の破線は、赤方偏移範囲 $7 \leq z \leq 14$ において IGM が中性化していると仮定し計算を行った結果。

$z > 14$ において紫外線背景放射強度が $I_{21} = 1$ 程度であれば、 τ_e は WMAP の値を達成可能である。

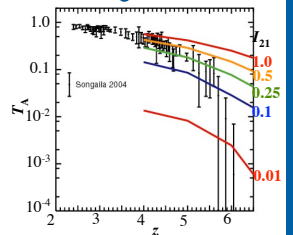
WMAP の結果を満たすためには、

$z > 14$ における電離が不可欠である。

$z > 14$ における紫外線強度として以下の値が必要
 $I_{21} \geq \alpha (1+z/22)^5 (L/8 \text{ Mpc})$

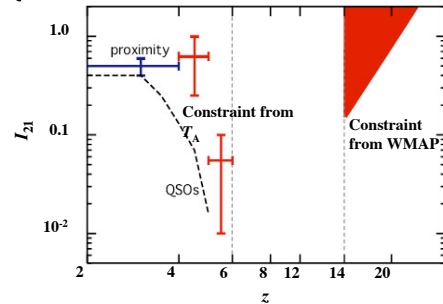
5 Evolution of UV Intensity

電離構造計算結果を用いて、クエーサー吸収線系を生成。各吸収線系について transmitted fraction T_A を評価し、観測結果 (Songaila 2004) との比較も行った。右図にその結果を示す。
観測された T_A の赤方偏移変化は紫外線背景放射の強度変化を必要とする。



The evolution of UV intensity is summed up in the bottom figure.

[The intensity inferred from the proximity effect (Giallongo et al. 1996) is also shown. The contribution of observed quasars (Haardt & Madau 1996) is plotted.]



WMAP による Thomson 散乱の optical depth は、 $z > 14$ において $z \approx 4$ と同程度かそれ以上の紫外線放射強度を必要とする。

References

Giallongo, E. et al. 1996, ApJ, 466, 46
Haardt, F. & Madau, P. 1996, ApJ, 461, 20
Kogut, A. et al. 2003, ApJS, 149, 161
Spergel, D. N. et al. 2003, ApJS, 148, 175
Songaila, A. 2004, AJ, 127, 2598
Tajiri, Y., & Umemura, M. 1998, ApJ, 502, 59