

21cm線-Lyman- α emitter相互相関による 再電離期21cm線シグナルの検出可能性

久保田賢志*, 吉浦伸太郎, 高橋慶太郎, 長谷川賢二, 矢島秀伸,
大内正己, B. Pindor, R.L.Webster

*熊本大学:175d9001@st.kumamoto-u.ac.jp



21cm線観測

宇宙再電離期を直接観測する手法として中性水素の超微細構造由来の21cm線を観測する方法がある。現在21cm線はMurchison Widefield Array(MWA)やLow Frequency Array(LOFAR)などの電波望遠鏡により観測され始め、2020年頃にはSquare Kilometre Array(SKA)による詳細な観測が予定されている。

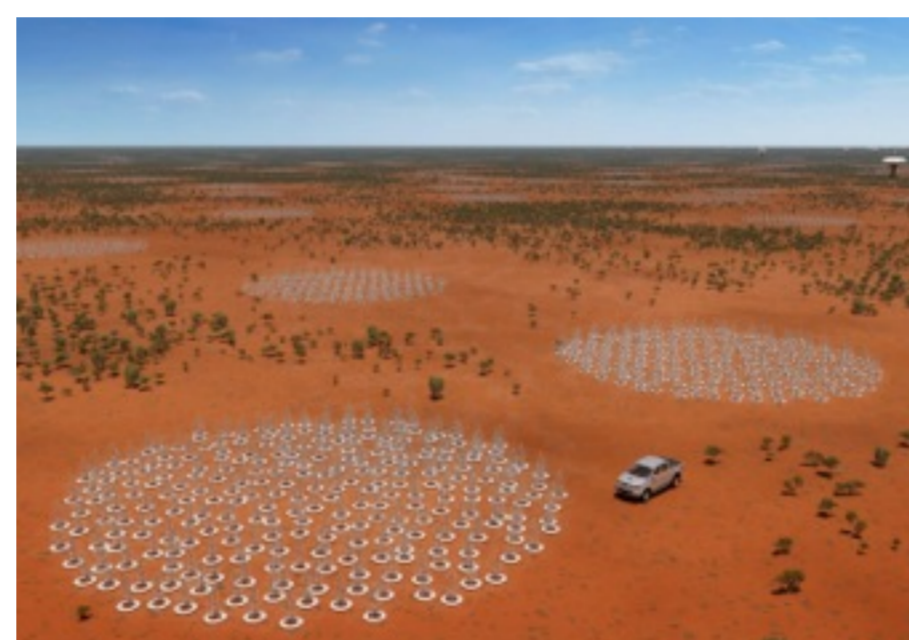
MWA(オーストラリア)



LOFAR(オランダ)



SKA1-Low(オーストラリア)



しかし、21cm線は近傍の銀河系シンクロトロン放射や系外電波といった強烈な前景放射(foreground)に覆い隠されてしまい、**未だ検出されていない**。(前景放射に埋もれた観測量から21cm線シグナルを同定するのは極めて困難。)

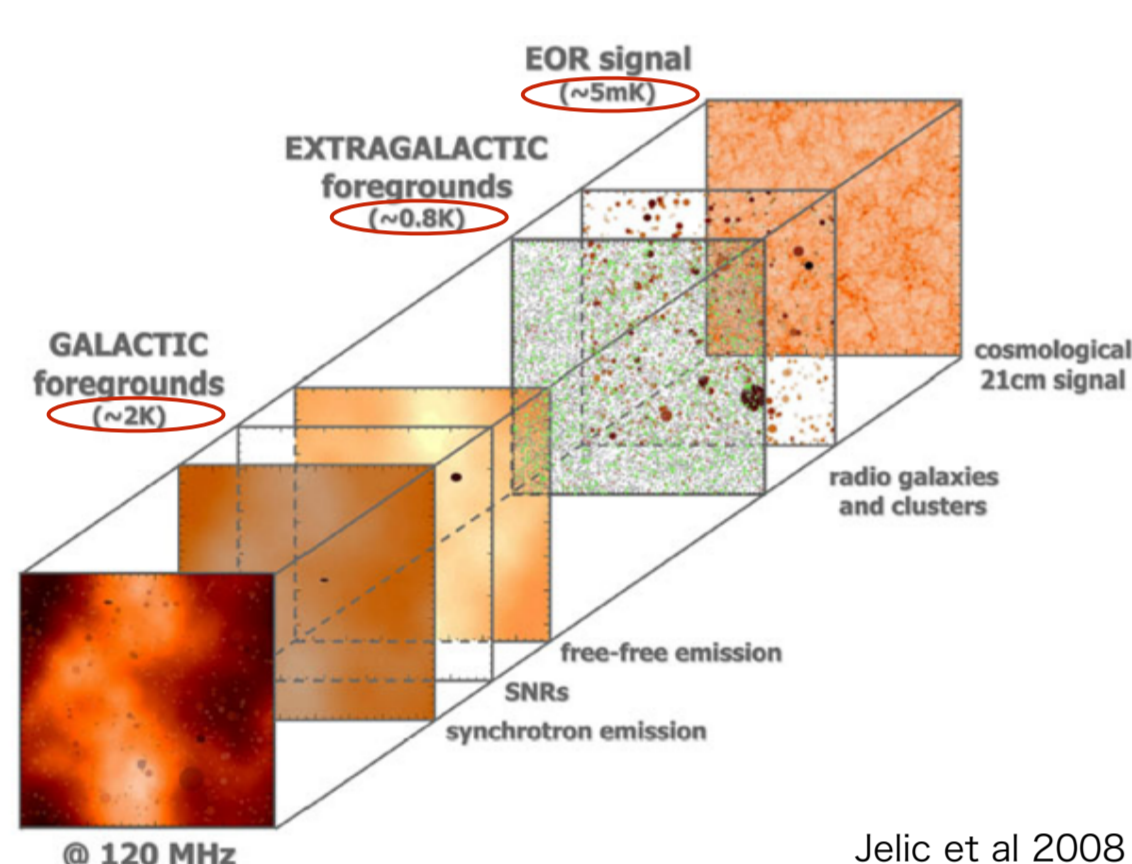


Fig.1. 21cm線観測における前景放射(イメージ)。一番奥のパネルは予測される21cm線シグナル。その手前に前景放射が多数存在し、これらは21cm線シグナルと比較すると温度[K]にして4桁以上大きい。

21cm線-Lyman- α emitter相互相関

前景放射の影響を低減する方法として、21cm線とLyman- α emitter(LAE)との相互相関に注目した。LAEとはLyman- α (1216 Å)で特徴的な輝線を持つ遠方銀河の一つである。一般的にLAEは電離領域に分布するため、21cm線とは反相関の関係にあると予想される。一方で、前景放射とLAEの分布には相関関係が無いため観測される21cm線とLAEとの相互相関を取ることによって原理的に21cm線シグナルを同定することができる。

※前景放射との相関(平均)はゼロだが、その分散は残る[1]。

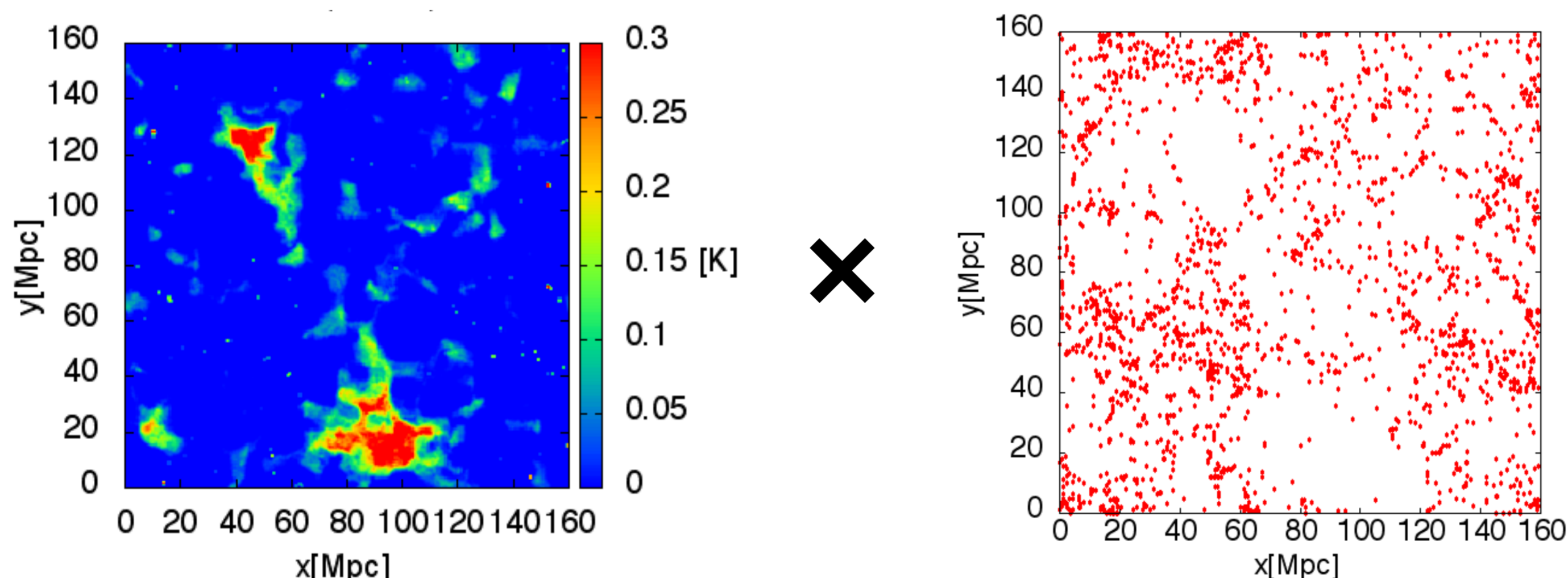


Fig.2. 予測される21cm線輝度温度分布(左図)とLAE分布(右図)。21cm線輝度温度が高い領域(中性領域)にはLAEは分布せず、21cm線輝度温度が低い(電離領域)に多く分布する(反相関)。

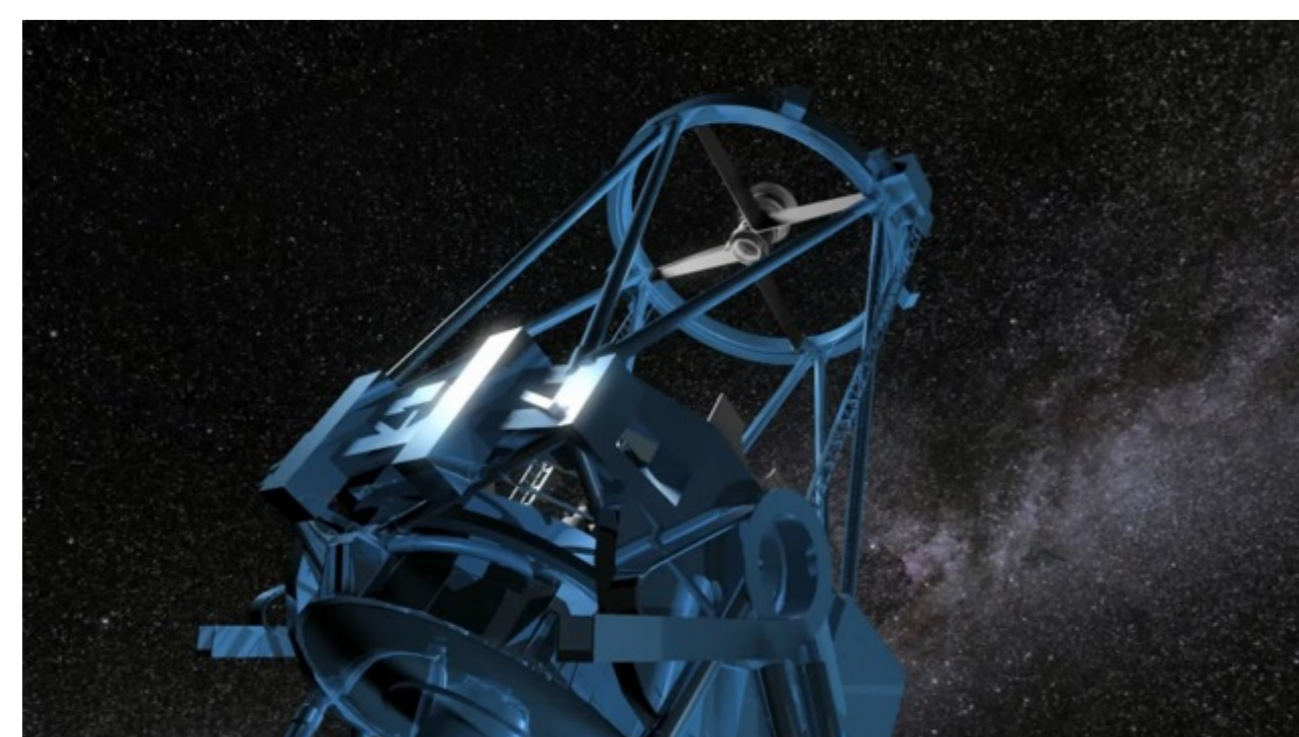
LAE探査

現在LAEはすばる望遠鏡のHyper Suprime-Cam(HSC)により観測されており、既に初期成果も報告されている[2-6]。HSCは1.5deg²の広視野を実現し、狭帯域フィルターを用いて赤方偏移z=5.7-7.3におけるLAEを探査する。

しかし、HSCは $\Delta z=0.1$ 程度の赤方偏移不定性があり、個々のLAEの赤方偏移を正確に決定することができない。そこで、

Prime Spectrograph System(PFS)分光装置を用いて個々のLAEの赤方偏移を $\Delta z=0.0007$ の高精度で決定する計画がある。

Hyper Suprime-Cam



ICRR, University of Tokyo

21cm-LAE cross-power spectrum

相互相関における観測量はフーリエ空間における21cm線輝度温度とLAEの数密度の空間的揺らぎの積のアンサンブル平均として与えられ、cross-power spectrumと呼ばれる。

$$\langle \tilde{\delta}_{21}(\mathbf{k}_1) \tilde{\delta}_{\text{gal}}(\mathbf{k}_2) \rangle \equiv (2\pi)^3 \delta_D(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) P_{21, \text{gal}}(\mathbf{k}_1),$$

cross-power spectrum

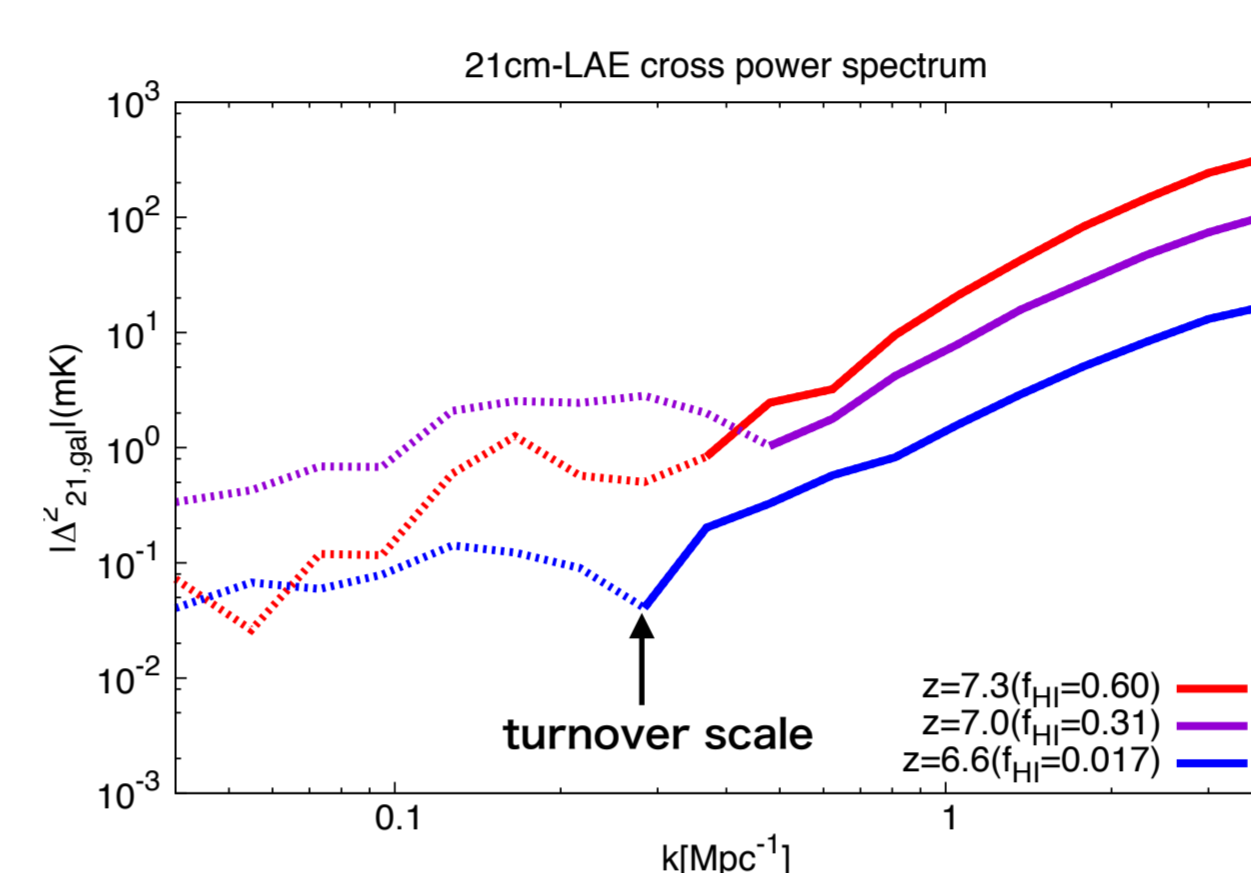


Fig.3. 21cm-LAE cross-power spectrumの赤方偏移進化。(赤方偏移z, 中性率f)=(7.3, 0.60), (7.0, 0.31), (6.6, 0.017)。実線は正值、点線は負値を表す。
※データ提供: K-computer@RIKEN AICS, XC30@NAOJ CfCA (Hasegawa+ in prep.)

- ・大スケールの負値は21cm線シグナルとLAEの反相関を反映している。
- ・小スケールの正值は電離領域内の低密度領域とLAE周囲の電離領域との相関を反映し、符号が遷移するスケール(turnover scale)は電離領域(バブル)のサイズに対応する。

検出可能性

本研究では、MWAやSKAの21cm線観測とHSCのLAE探査を組み合わせたcross-power spectrumの検出可能性を検証する。また、PFS分光観測の必要性についても検証する。cross-power spectrumに対するエラーはsample variance($P_{21}, P_{\text{gal}}, P_{21, \text{gal}}$)や21cm線観測における熱的雑音(σ_N)、LAE探査におけるshot noise(σ_g)のcross-termで与えられる。

$$\sigma_A(k) \propto \sqrt{P_{21, \text{gal}}^2 + P_{21} P_{\text{gal}} + P_{21} \sigma_g + \sigma_N P_{\text{gal}} + \sigma_N \sigma_g}.$$

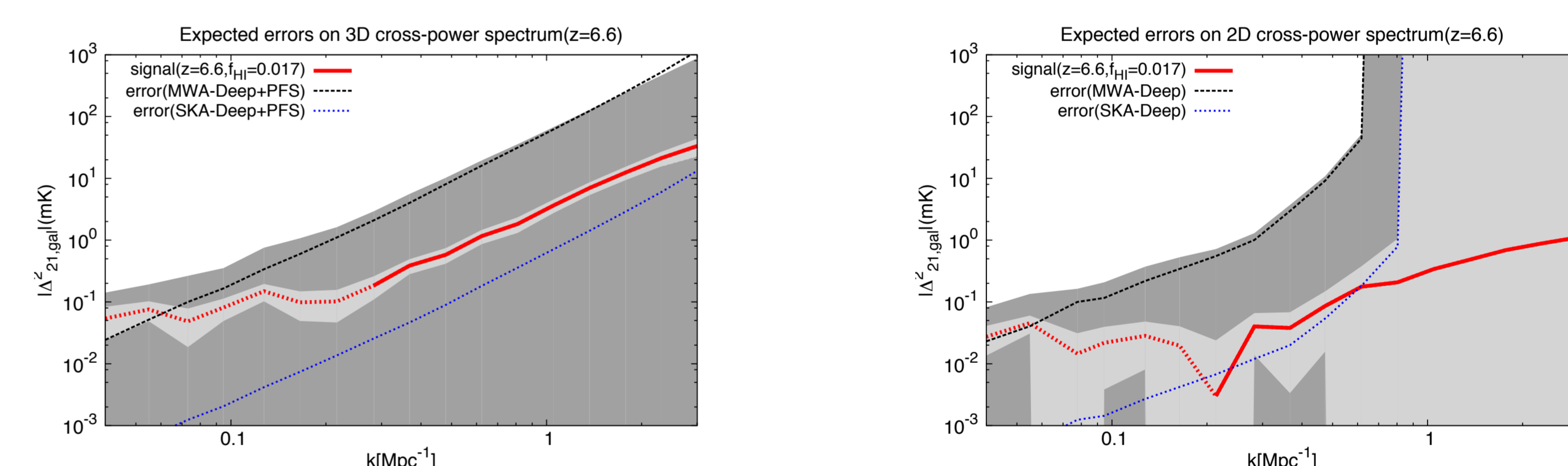


Fig.4. 予測されるcross-power spectrum(赤)と観測エラー(MWA×HSC;黒, SKA×HSC;青)との比較。影(濃;MWA, 薄;SKA)はsample variance。左図はPFS分光観測有り、右図は無し。
※21cm線観測は1000時間観測、HSCの観測領域は27deg²を想定。

- ・SKAの先行機であるMWAでも大スケールでcross-power spectrumを検出可能。
- ・SKAは大スケールでcross-power spectrumを有意に検出可能。
- ・SKAとPFSを組み合わせることで、小スケールでも検出可能になる。

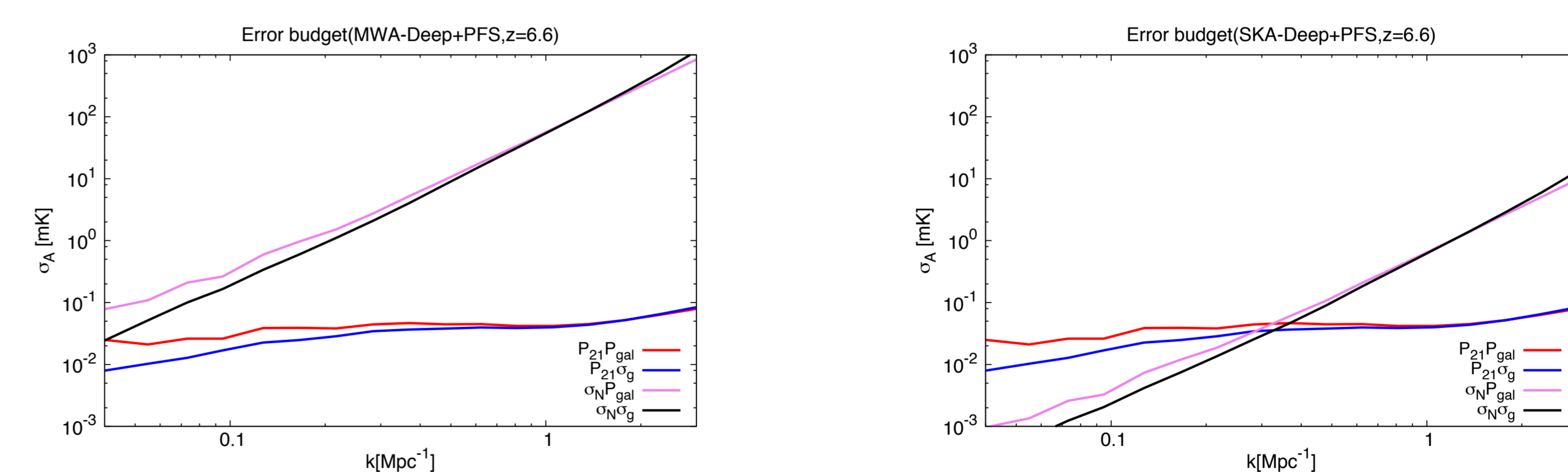


Fig.5. エラーの内訳。左図はMWA×HSC+PFS、右図はSKA×HSC+PFS。

- ・MWAの場合、21cm線観測の熱的雑音(σ_N)が支配的。
→ 検出可能性を高めるためには熱的雑音を小さくすることが重要。
- ・SKAの場合、大スケールでは21cm線観測のsample variance(P_{21})が支配的。
→ 21cm線観測は1000時間も必要なく、観測領域を広げることが重要。

Reference :

- [1]Yoshiura, S., Line, J. L. B., Kubota, K., Hasegawa, K., & Takahashi, K. 2017, arXiv:1709.04168
- [2]Ouchi, M., Harikane, Y., Shibuya, T., et al. 2017, arXiv:1704.07455
- [3]Shibuya, T., Ouchi, M., Konno, A., et al. 2017, arXiv:1704.08140
- [4]Shibuya, T., Ouchi, M., Harikane, Y., et al. 2017, arXiv:1705.00733
- [5]Konno, A., Ouchi, M., Shibuya, T., et al. 2017, arXiv:1705.01222
- [6]Inoue, A. K., Hasegawa, K., Ishiyama, T., et al. 2017, arXiv:1801.00067