

原始磁場と暗黒時代 におけるkSZ効果

箕田鉄兵 (名古屋大学 D2), 田代寛之

Introduction～磁場の起源～



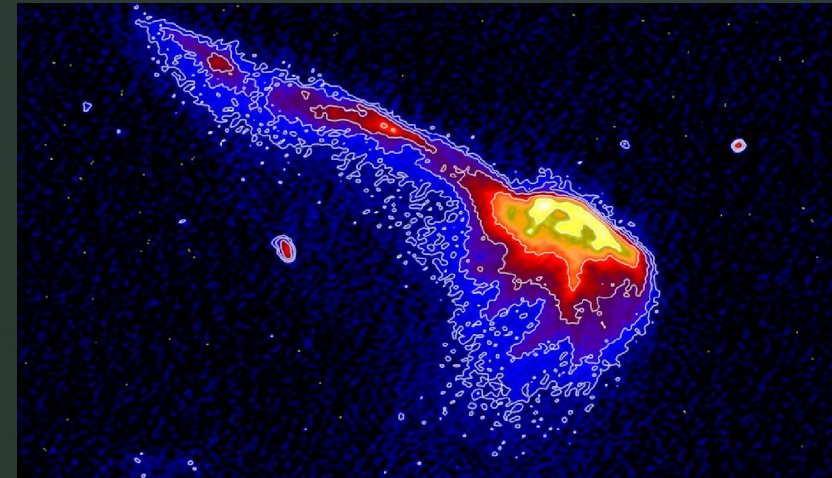
星形成

超新星残骸



銀河

活動銀河核



銀河団

大規模構造、ボイド(?)

- 宇宙物理の様々なスケールで磁場が存在
- 起源が不明 (天体起源 or 初期宇宙? 時代、空間スケール...?)

Introduction～磁場の起源～



- 天体起源とすると暗黒時代に磁場が存在しないが、初期宇宙論起源だと思ふとあるはず
=> 暗黒時代の磁場を探れば宇宙における磁場の起源に迫れるかも？

目的：暗黒時代の構造形成に磁場が与える影響を調べ、

原始磁場の観測的な兆候を手に入れる

宇宙論的磁場: 構造形成への影響

- 密度場(速度場)の時間進化

ローレンツ力でmatter clusteringを促進する

- 電離史

磁気流体力学の散逸機構によってガスが加熱され、衝突電離を強める

再結合と光電離のバランスを変化させる

=> 観測量: kinematic Sunyaev-Zel'dovich効果 (kSZ効果) に着目

密度揺らぎ(パワースペクトル)への影響

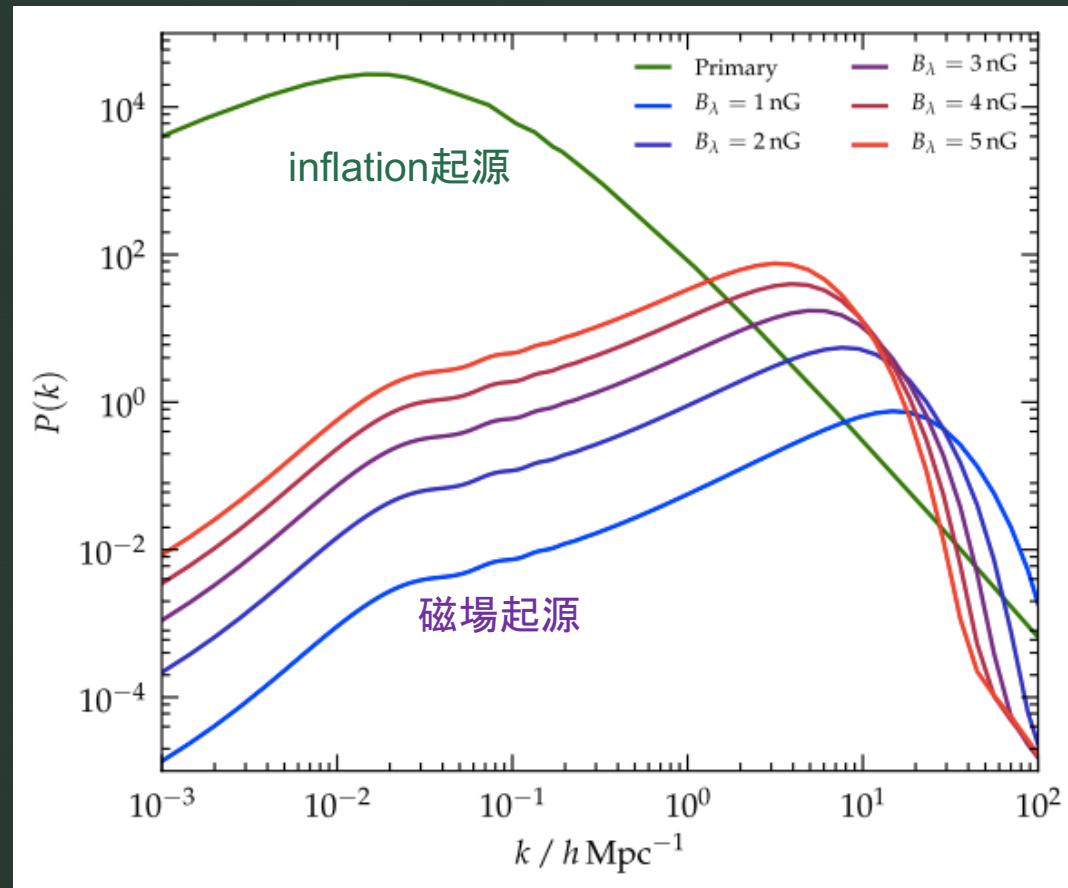
$$P(k) \sim \langle \delta(\mathbf{k}) \delta^*(\mathbf{k}') \rangle$$

磁場のローレンツ力(の発散)によって 10-100 kpc 程度の小スケール密度揺らぎを増幅する

$$\delta_b \propto \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$

初期宇宙での天体形成を促進

⇒ 21cm power spectrum,
銀河団の number count
Ly-alpha flux power spectrum
などに影響



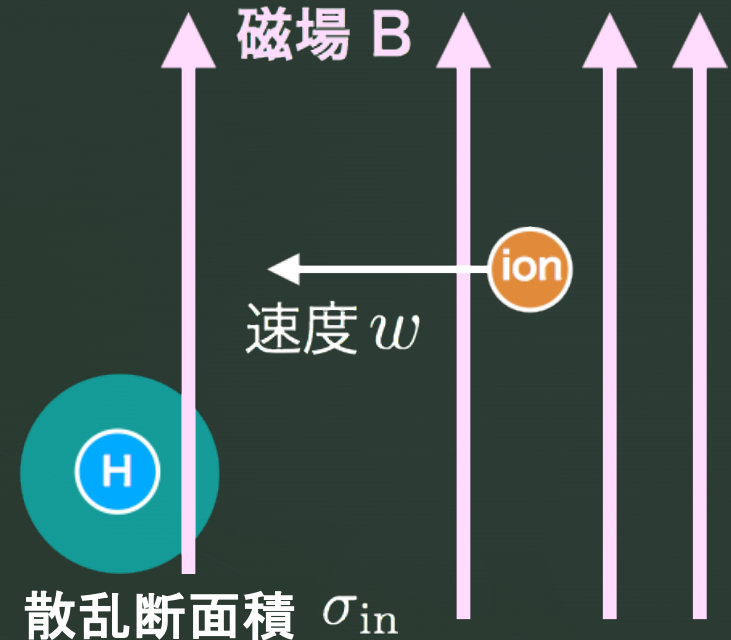
(arXiv:1006.4242)

宇宙論的磁場の散逸機構

- 先行研究 (Sethi & Subramanian 2005)
- 晴れ上がり以降の弱電離プラズマで中性水素と自由電子の衝突によって**双極性散逸**が生じる
- 3 nG 程度の磁場によってガスが10000 K 程度まで加熱される

- 加熱率
$$\Gamma = \frac{|(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}|^2}{16\pi^2 \xi \rho_b^2} \frac{(1 - x_i)}{x_i}$$

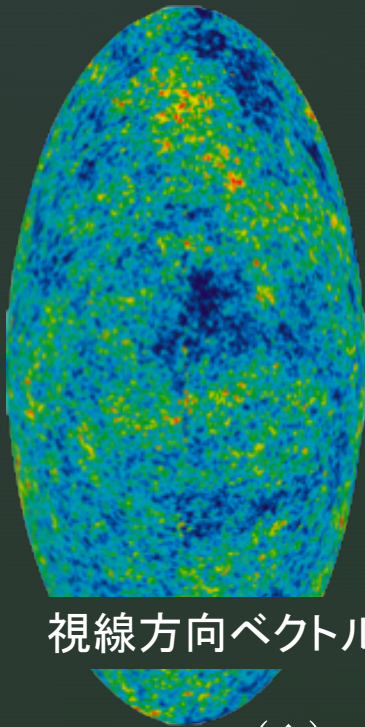
- 衝突率
$$\xi = \frac{\langle w \sigma_{in} \rangle}{m_i + m_n} \simeq 1.9 \times 10^{14} (T/1K)^{0.375} [\text{cm}^3/\text{g/s}]$$



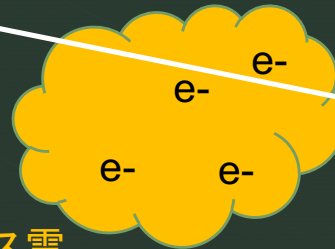
(arXiv:0804.2856)

Sunyaev-Zel'dovich効果 (SZ効果)

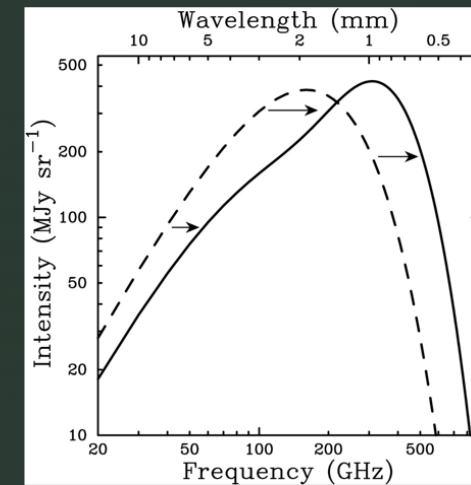
晴れ上がり (CMBの最終散乱面)



自由電子との散乱によってCMB
光子のスペクトルが変化する現象



電離したガス雲



光子

観測者



(astro-ph/0208192)

視線方向ベクトル $\hat{n}$ に対するSZの大きさは

$$y(\hat{n}) \equiv \int \underbrace{n_e(\hat{n}, \chi')}_{\text{密度}} \sigma_T \frac{\underbrace{u_b(\hat{n}, \chi')}_{\text{速度}}}{c} d\chi'$$

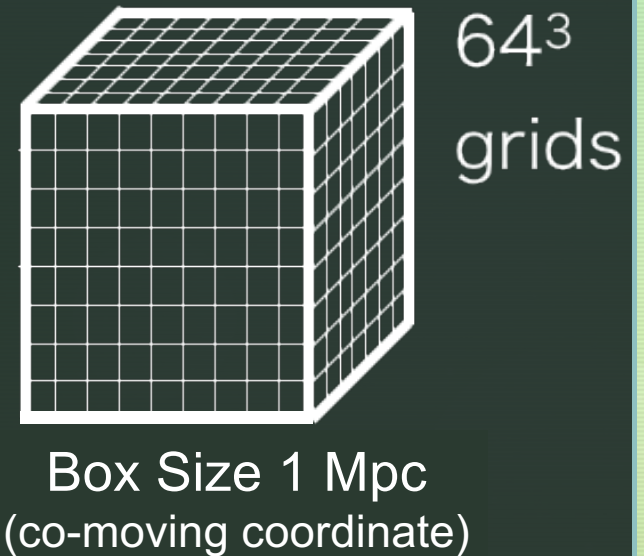
計算手法

1. 磁場の3次元分布

ベクトルポテンシャル $\mathbf{A}$

磁場 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$

ローレンツ力 $\mathbf{L} = \frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{4\pi}$



2. 密度、温度、電離度の計算

ローレンツ力による密度への影響

双極性散逸による温度、電離度への影響

暗黒時代の構造形成

- 密度場と速度場の時間進化

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_b \mathbf{u}_b) = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{u}_b}{\partial t} + (\mathbf{u}_b \cdot \nabla) \mathbf{u}_b = -\frac{\nabla p}{\rho_b} + \frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{4\pi \rho_b} - \nabla \Phi \end{cases}$$

- 線形摂動近似

$$\delta_b(t) \propto \frac{\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}_0) \times \mathbf{B}_0}{4\pi \bar{\rho}_{b,0} a^3(t) H^2(t)} a(t), \quad |\mathbf{u}_b(t)| \propto \frac{H\delta}{k} a(t)$$

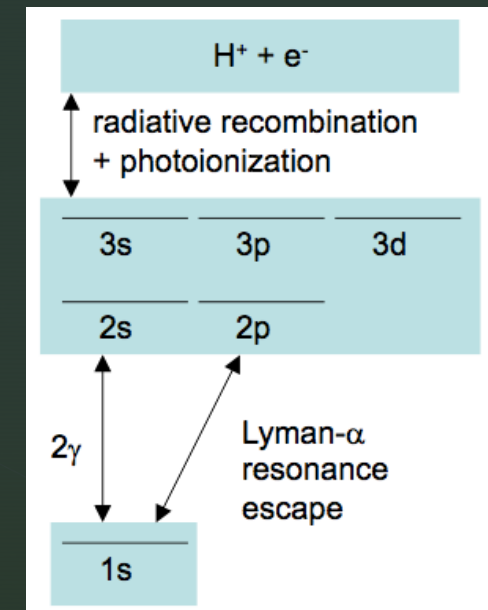
温度、電離度の計算

- 温度進化

- 先行研究にならって、「宇宙膨張 + CMB + 磁場による加熱」を考慮
- さらに、より現実的なモデルとして密度揺らぎに伴う温度変化、制動放射などに伴う冷却効果も考慮

- 電離度進化

- 水素原子について “Effective three-level model” を仮定
- 数値計算コード RECFAST を参考にして、衝突による再結合、CMBによる光電離、衝突による再電離を考慮



(astro-ph/9912182)

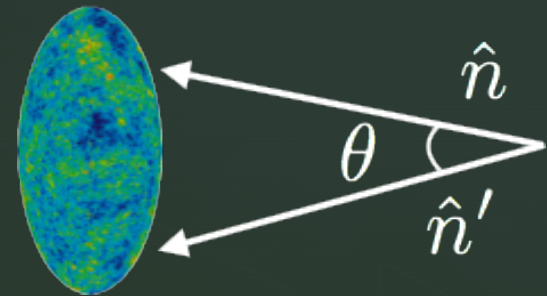
kSZ効果の見積もり

3. CMBの温度揺らぎを計算

$$y(\hat{n}) \equiv \int n_e(\hat{n}, \chi') \sigma_T \frac{u_b(\hat{n}, \chi')}{c} d\chi'$$

10 < z < 1000 で積分し、2次元角度
パワースペクトル D_ℓ を見積もる

$$\text{multipole } \ell \sim \frac{\pi}{\theta}$$



$$D_\ell = \frac{\ell(\ell + 1)}{2\pi} \frac{(g_\nu T_\gamma)^2}{4\pi} \int P_\ell(\cos \theta) \langle y(\hat{n}) y(\hat{n}') \rangle d^2 \hat{n} d^2 \hat{n}'$$

(ルジャンドル多項式で展開)

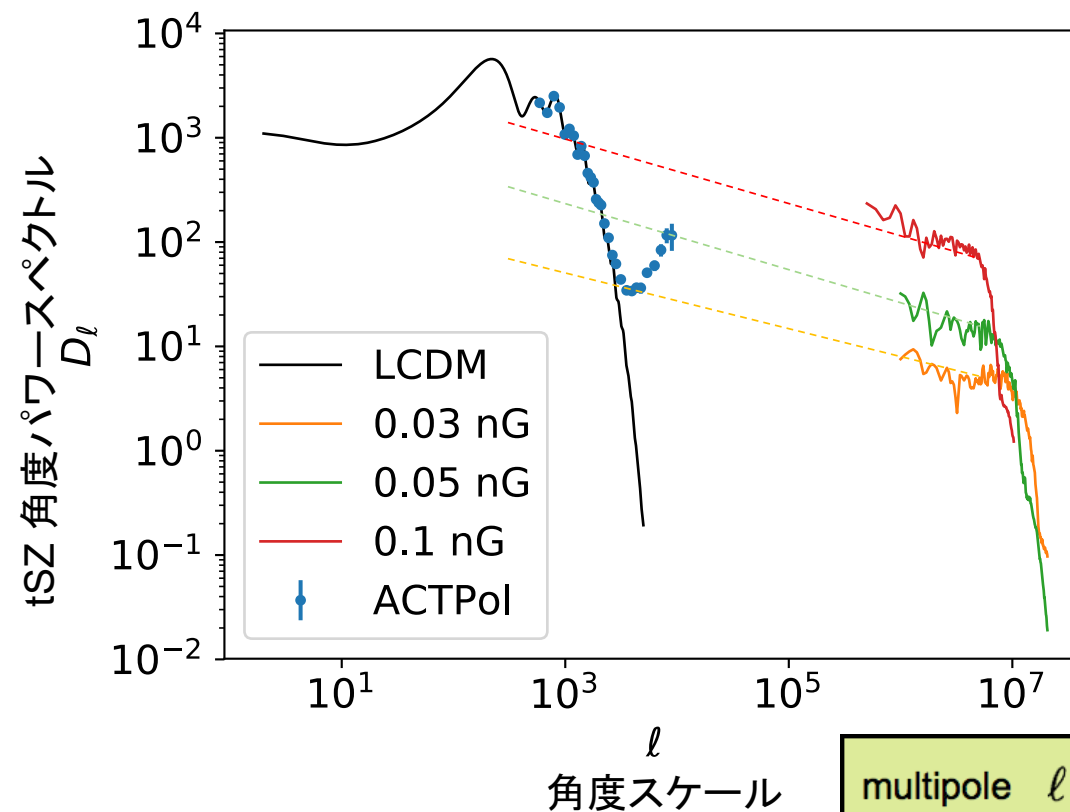
計算結果

速度場のパワースペクトルを反映して large-scale (low- ℓ) で強いシグナル

$\ell \sim 8000$ のACT, SPTなどのデータで $O(0.01)$ nG の制限になるかも？
(c.f. *Planck*: $B < 4.4$ nG)

積分区間としてはおよそ $500 < z < 700$ の時代を反映

(Minoda and Tashiro, in prep.)

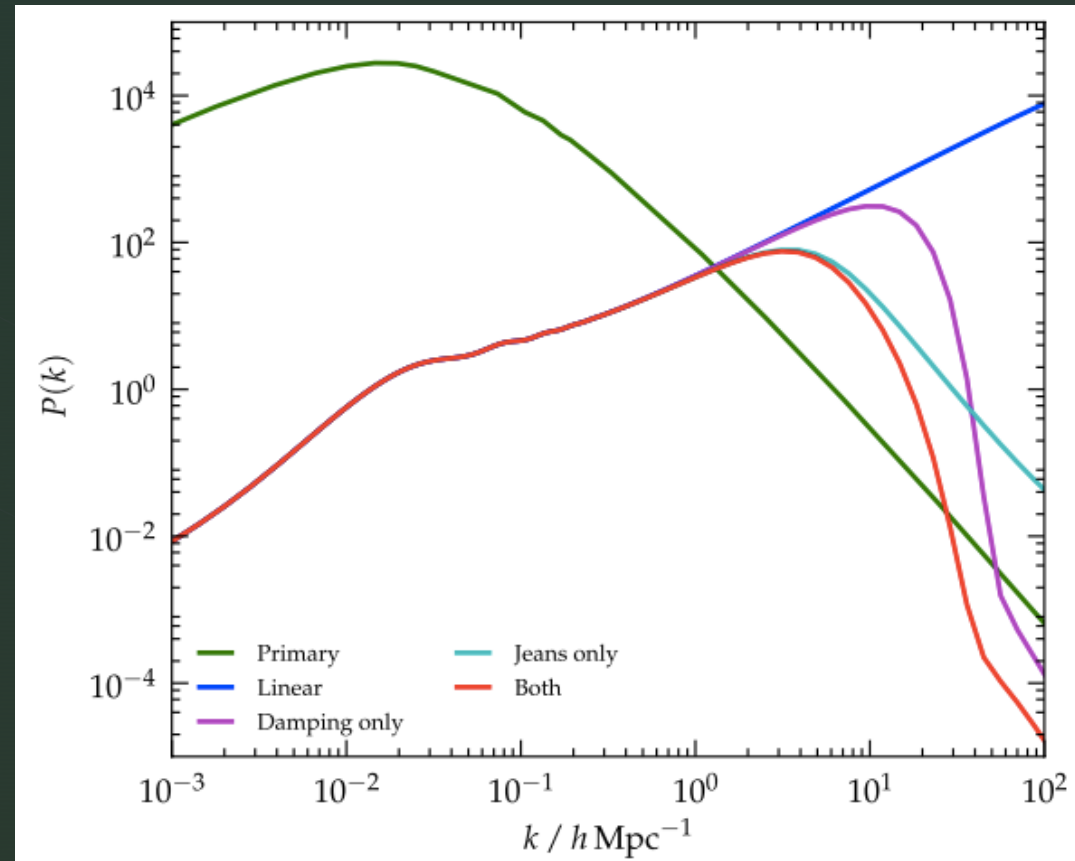


まとめ

- 天体に付随する磁場の起源？ > 原始磁場
- ガスの密度(速度)、温度、電離度の進化を計算
- 運動学的スニヤエフ・ゼルドビッチ効果 (kSZ)によるCMB温度揺らぎへの影響を見積もった
- kSZの観測によって原始磁場の観測的兆候が得られる可能性

密度揺らぎ(パワースペクトル)への影響

- 青: linear matter power
- 紫: バリオン光子流体の粘性による 拡散減衰
- 水色: magnetic Jeans 効果
- 赤: 拡散減衰 + Jeans



(arXiv:1006.4242)

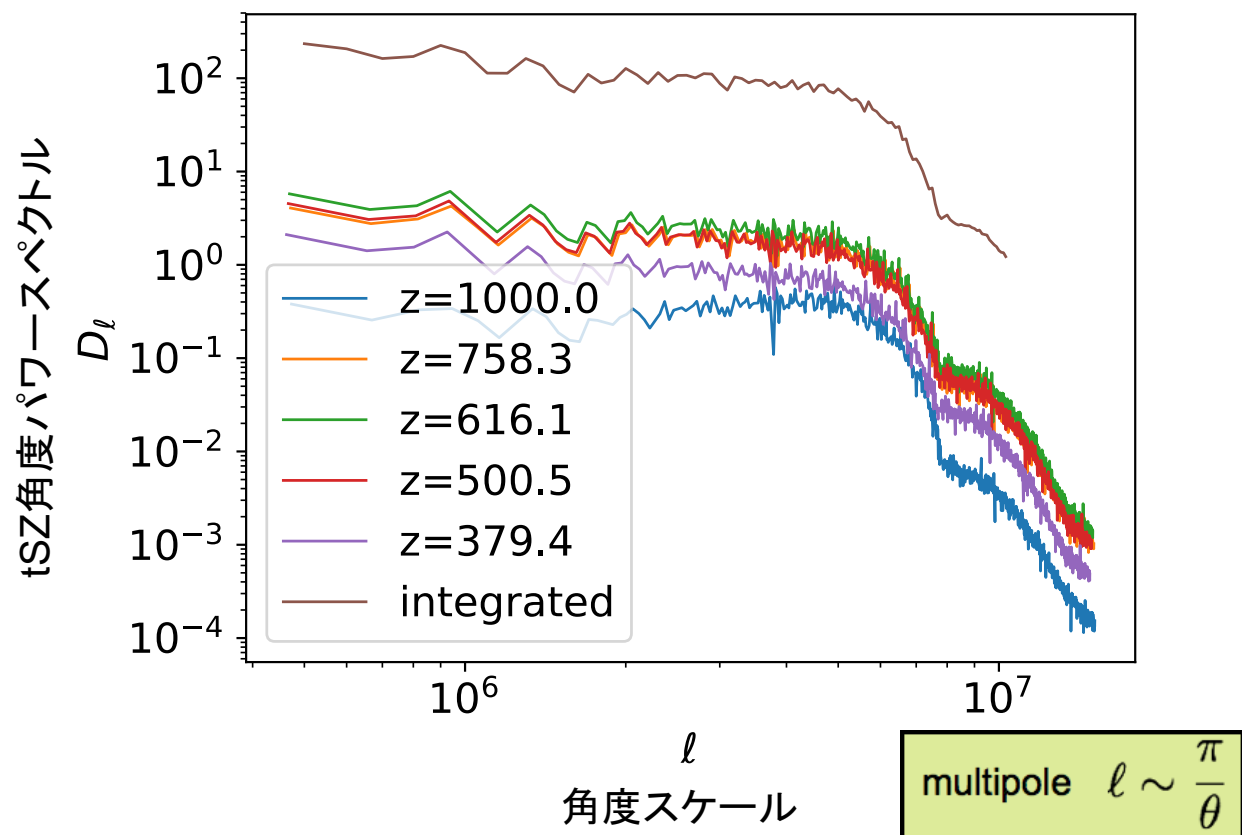
計算結果

速度場のパワースペクトルを反映して large-scale (low- ℓ) で強いシグナル

$\ell \sim 8000$ の ACT, SPT などのデータで $O(0.01)$ nG の制限になるかも？
(c.f. *Planck*: $B < 4.4$ nG)

積分区間としては
 $500 < z < 700$ の時代を反映

(Minoda and Tashiro, in prep)



磁場のモデル

- 統計的一様性と等方性を仮定
- 磁場の2点相関とパワースペクトル

$$\langle B_i(\mathbf{k}) B_j^*(\mathbf{k}') \rangle = \frac{(2\pi)^3}{2} \delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}') (\delta_{ij} - k_i k_j) P_B(k)$$

$$P_B = A_B k^n$$