

早期加速膨張に対する CMBからの制限

名古屋大学 At研 M2 小林量平

共同研究者:市來淨與さん(名古屋大学)

高橋慶太郎さん(熊本大学)

Introduction

遠方のIa型超新星の観測(RIESS, 1998)



現在の宇宙の加速膨張を示唆。

加速膨張を説明するモデル:

- ・宇宙項 Λ (標準宇宙論で採用)
- ・ダークエネルギー(quintessence, k-essence, etc.)
- ・Voidモデル(非一様宇宙を仮定)
- ・修正重力理論

宇宙項Λの問題点

- fine-tuning

⇒ 場の量子論から計算される真空エネルギー期待値と、観測から得られる真空エネルギーの値に123桁ものズレがある。
(cutoff: Planck Scale)

- coincidence

⇒ 我々が生きているこの時代に、なぜ真空エネルギーが支配的になり、加速膨張を引き起こしているのか

この研究のMotivation

Coincidence Problemの解決

我々の生きている現在の加速膨張期は、
宇宙の歴史において”特別”なのか？



周期的加速膨張をする、ダークエネルギーの
モデルも存在する。



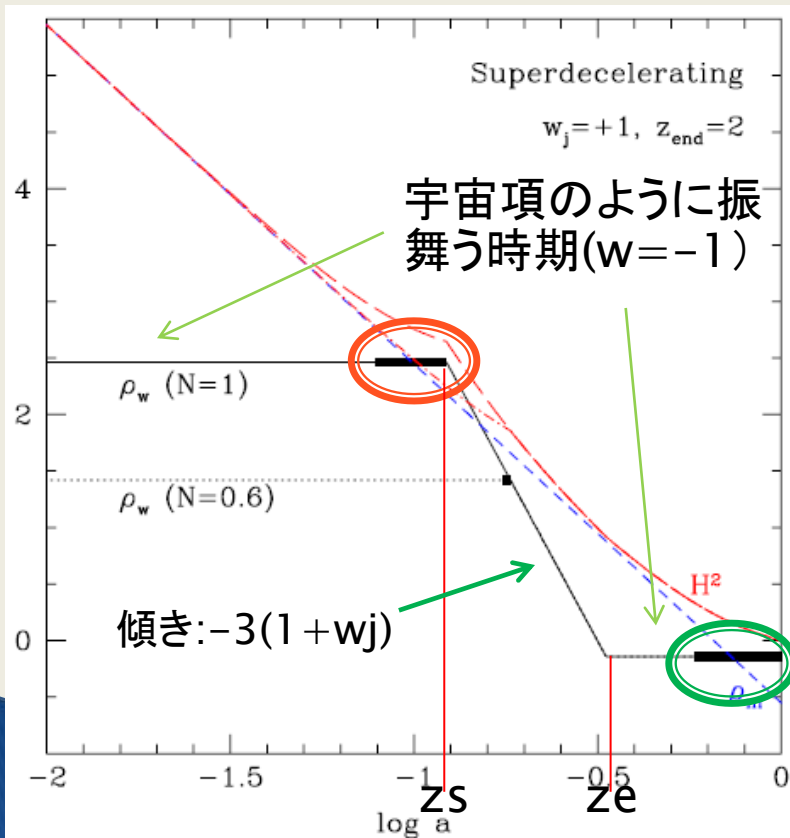
我々の生きている時代の前に早期加速膨張があったの
では？その痕跡を観測から見つけたい。

Super-decelerating model(Linder,2010)

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_{total} + 3p_{total}) > 0$$



$$w_{total}(a) = \frac{p_{total}(a)}{\rho_{total}(a)} = \frac{p_{DE}(a)}{\rho_{DE}(a) + \rho_m(a)} = w_{DE}(a)\Omega_{DE}(a) < -\frac{1}{3}$$



- $w = -1$, $\Omega_{DE}(a) > 1/3$ にして早期加速膨張を起こす。
- ある時期にエネルギー密度を急激に下げ、現在で Λ CDMに一致
- 変化期間: z_s, z_e で指定
傾き: w_j 3パラメータをもつ
- これらのパラメータ制限から早期加速膨張の痕跡を探る

CMBのパワースペクトルからの制限

Recombination後の早期加速膨張を仮定して、以下の効果より制限をつける。

- ・Projection effect
- ・Integrated Sachs–Wolfe(ISW) effect

これらの効果はダークエネルギーによる膨張則の変化にかかわるもの

Projection effect

天球面に射影された温度揺らぎを見込む角度 →
宇宙の幾何と膨張則に依存

$$l_{LS} \simeq k_{LS} r_A(z^*)$$

k_{LS}^{-1} : 最終散乱面でのゆらぎの共動スケール
 z^* : recombination時の赤方偏移

膨張則、(曲率の)変化



r_A (共動角径距離)の変化



パワースペクトルの曲線が
左右にシフトする

$$r_A^{K=0}(z) = \chi(z)$$

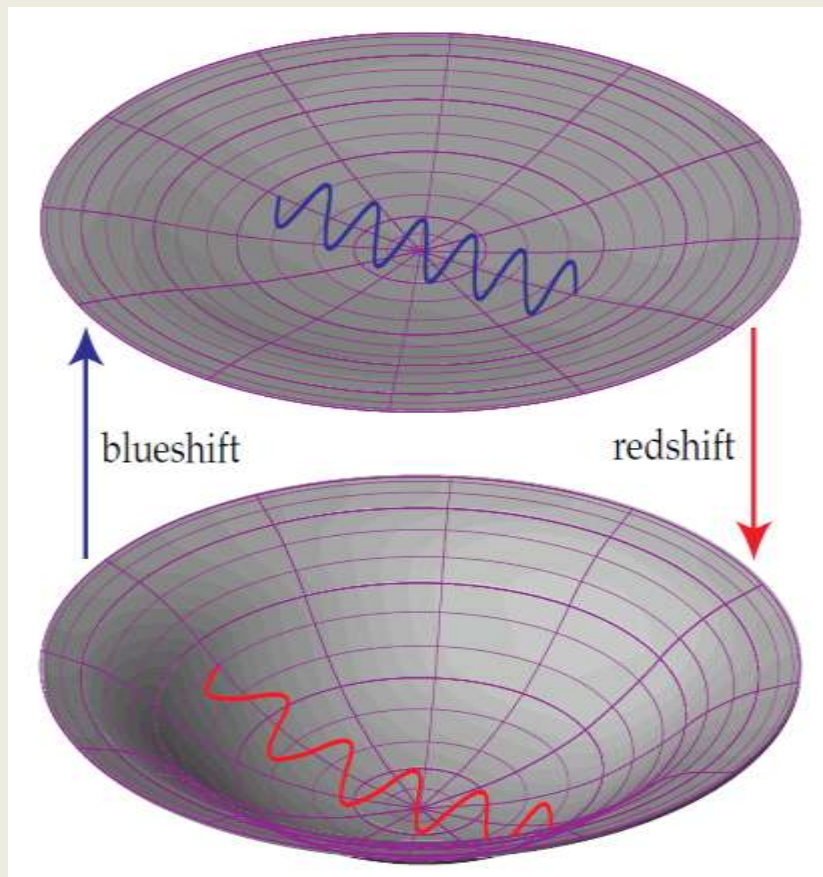
$$r_A^{K>0}(z) = \frac{\sin(\sqrt{|\Omega_K^0|} H_0 \chi(z))}{H_0 \sqrt{|\Omega_K^0|}}$$

$$r_A^{K<0}(z) = \frac{\sinh(\sqrt{|\Omega_K^0|} H_0 \chi(z))}{H_0 \sqrt{|\Omega_K^0|}}$$

$$\chi(z) = \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

$$\Omega_k \equiv \Omega_{tot} - 1$$

ISW effect 1



CMB光子が宇宙空間を伝播



ダークエネルギーによる
膨張則の変化



重力ポテンシャルが時間と共に
浅くなり、青方変移



パワースペクトルの振幅が増大、
“もちあがり”ができる

ISW effect 2

$$C_l = 4\pi \int \frac{dk}{k} \mathcal{P}_\chi |\Delta_l(k, \eta_0)|^2$$

$\mathcal{P}_\chi(k)$: initial Power

$$\Delta_l(k, \eta_0) = \Delta_l^{\text{LSS}}(k) + \Delta_l^{\text{ISW}}(k)$$

Recombination時のホライズンより
大きなスケール, LSS:最終散乱面での
Sachs-Wolfe効果

$$\Delta_l^{\text{ISW}}(k) = 2 \int d\eta e^{-\tau(\eta)} \phi'_{jl} [k(\eta - \eta_0)]$$

τ : optical depth
 j : 球ベッセル関数

$$k^2 \phi' = -4\pi G \frac{\partial}{\partial \eta} [a^2 (\overline{\delta\rho_m} + \overline{\delta\rho_{de}})]$$

Hu & Sugiyama,
1995

ISW効果の計算をするには、matterとダークエネルギーのゆらぎの発展を追う必要がある

摂動方程式(synchronous gauge)

$$\delta'_{cdm}(\mathbf{k}, \eta) = -\frac{h'(\mathbf{k}, \eta)}{2} \quad \text{' : } \eta(\text{conformal time}) \text{ 微分}$$

$$\delta'_{de}(\mathbf{k}, \eta) + 3H(\eta)(\hat{c}_{s,de}^2(\mathbf{k}, \eta) - w_{de}(\eta))\delta_{de}(\mathbf{k}, \eta) = - (1 + w_{de})[1 + 9H^2(\hat{c}_{s,de}^2 - c_{a,de}^2(\eta))] \frac{v_{de}(\mathbf{k}, \eta)}{k} - (1 + w_{de}) \frac{h'}{2}$$

$$v'_{de} + H(1 - 3\hat{c}_{s,de}^2)v_{de} = -\frac{\hat{c}_{s,de}^2}{1 + w_{de}} k \delta_{de} \quad \text{これらを連立して解いて、ISW効果を計算する}$$

$$h''(\mathbf{k}, \eta) + H(\eta)h' =$$

$$-3H^2[\Omega_m(\eta)\delta_m + \Omega_{de}(\eta)(1 + \hat{c}_{s,de}^2(\mathbf{k}, \eta))\delta_{de} + 3H(1 + w_{de})(\hat{c}_{s,de}^2 - \hat{c}_{a,de}^2) \frac{v_{de}}{k}]$$

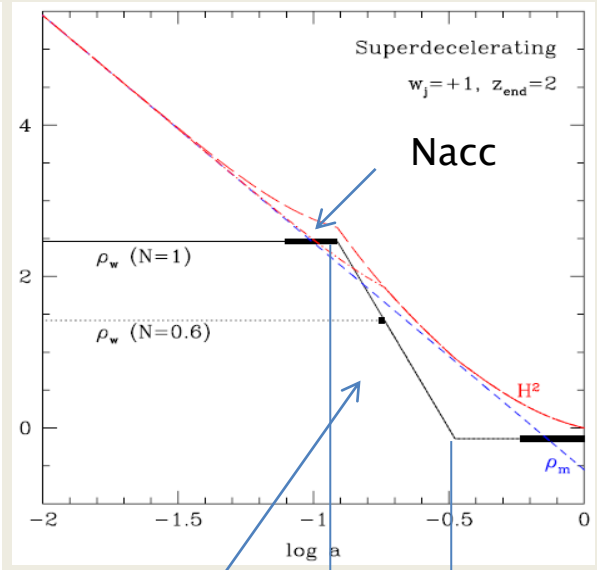
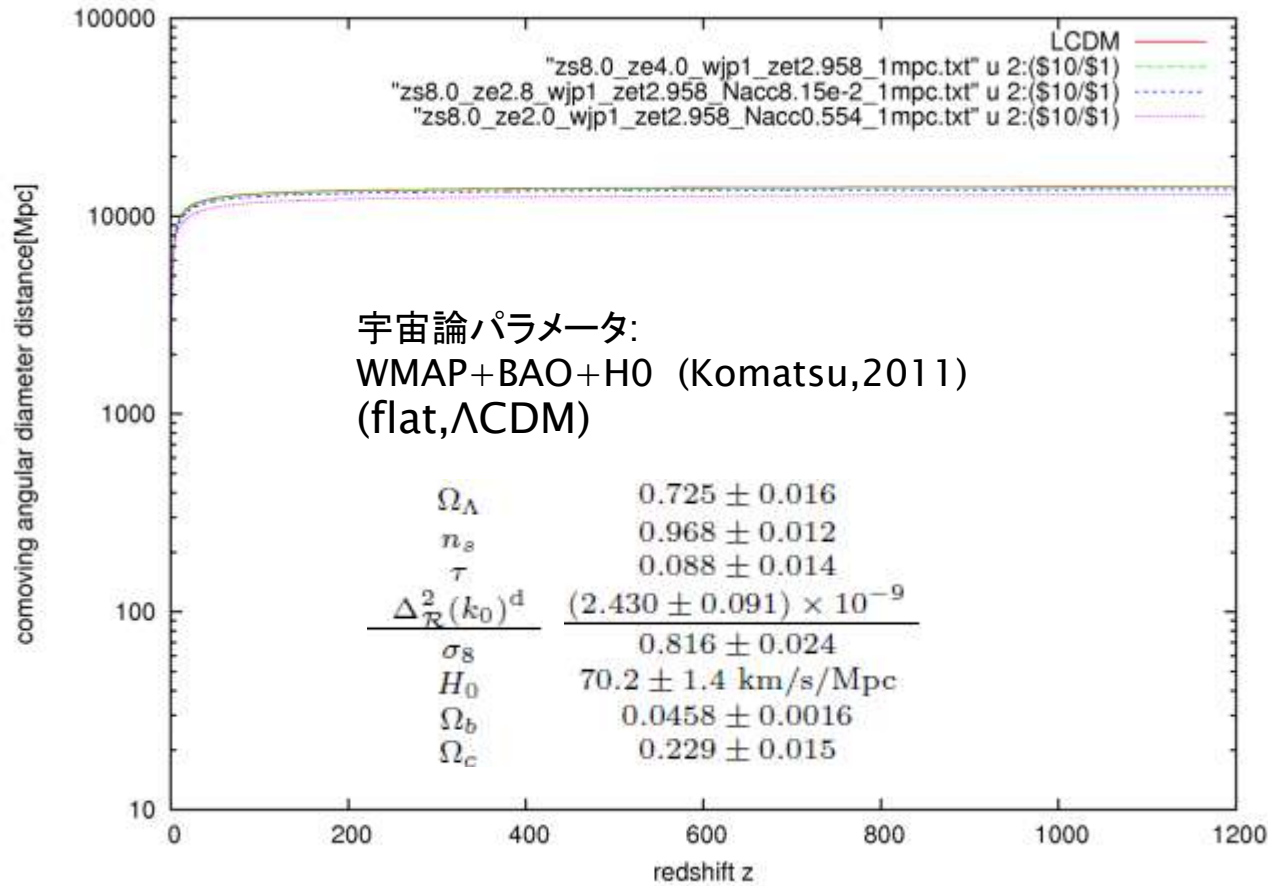
$$w_{de}(\eta) \equiv \frac{\bar{p}_{de}(\eta)}{\bar{\rho}_{de}(\eta)}$$

$$c_{a,de}^2(\eta) \equiv \frac{d\bar{p}_{de}(\eta)}{d\bar{\rho}_{de}(\eta)} = w_{de}(\eta) - \frac{w'_{de}}{3H(\eta)(1 + w_{de})}$$

$$H = \frac{da}{d\eta}$$

$$\hat{c}_{s,de}^2(\mathbf{k}, \eta) \equiv \frac{\hat{\delta}p_{de}(\mathbf{k}, \eta)}{\hat{\delta}\rho_{de}(\mathbf{k}, \eta)} \quad \text{Anisotropic stressは無視した}$$

共動角径距離($z_s=8, w_j=1$ に固定, z_e を動かした)



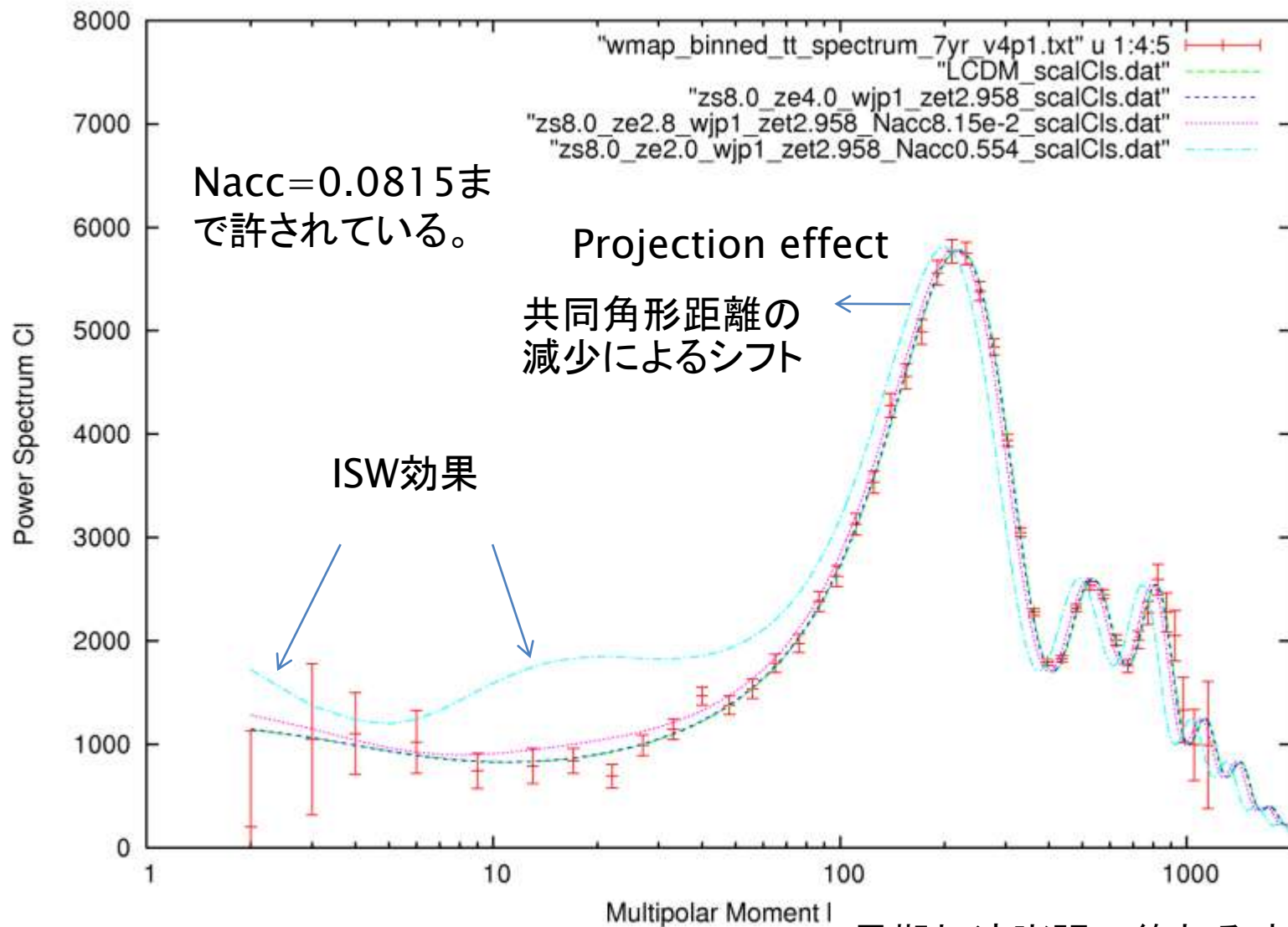
傾き: $-3(1+w_j)$

Zet: z_s を固定したときに、
早期加速膨張が
起こる境目となる
 z_e の値

Nacc: 早期加速膨張の
e-folding

早期加速膨張のNaccが大きいほど、共同
角形距離が短くなる→CIが左へシフトする

WMAP7からの制限(z_s を8, w_j を1に固定)



Nacc=0.0815まで許されている。

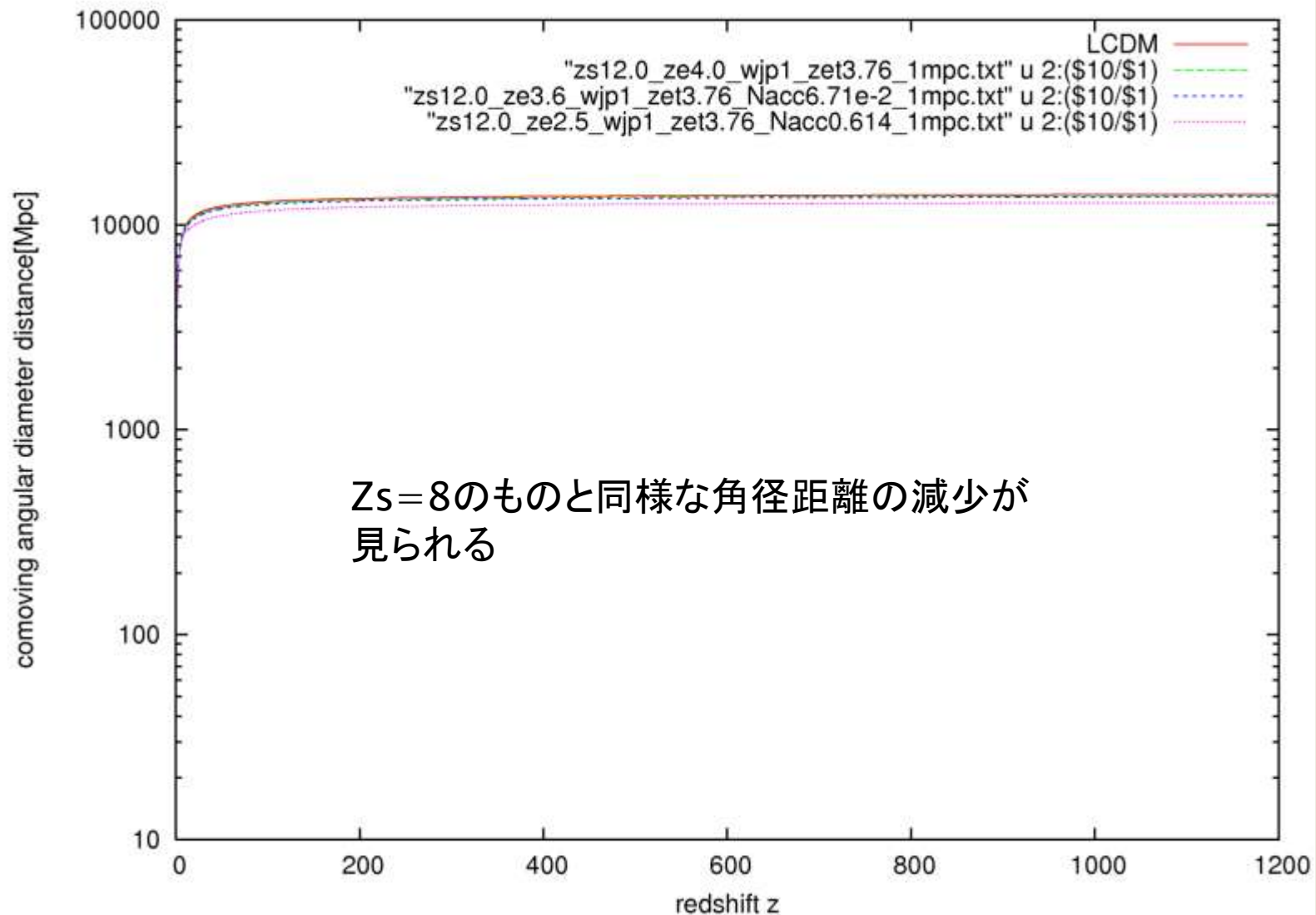
Projection effect

共同角形距離の減少によるシフト

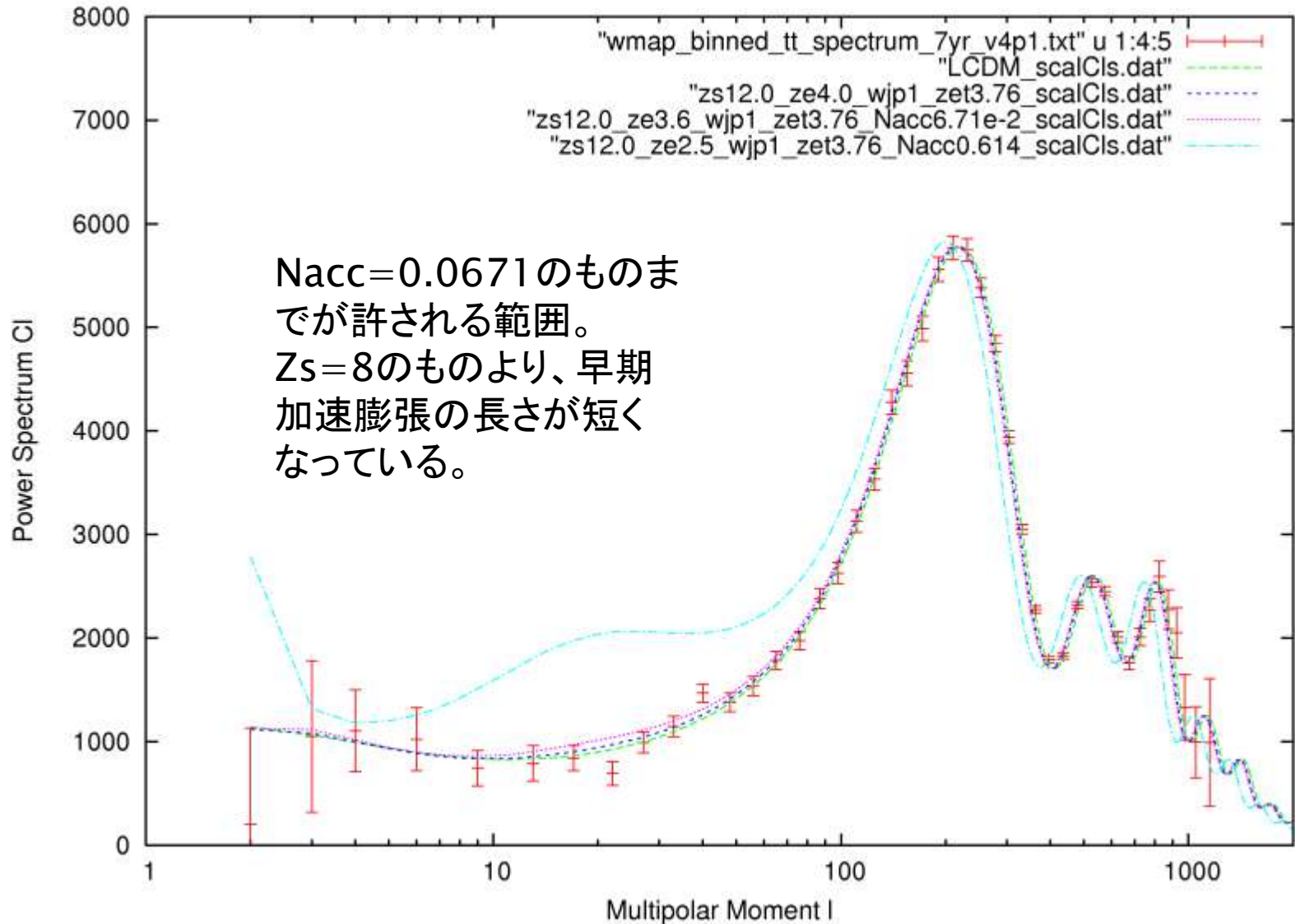
ISW効果

早期加速膨張の終わる時期: z_s

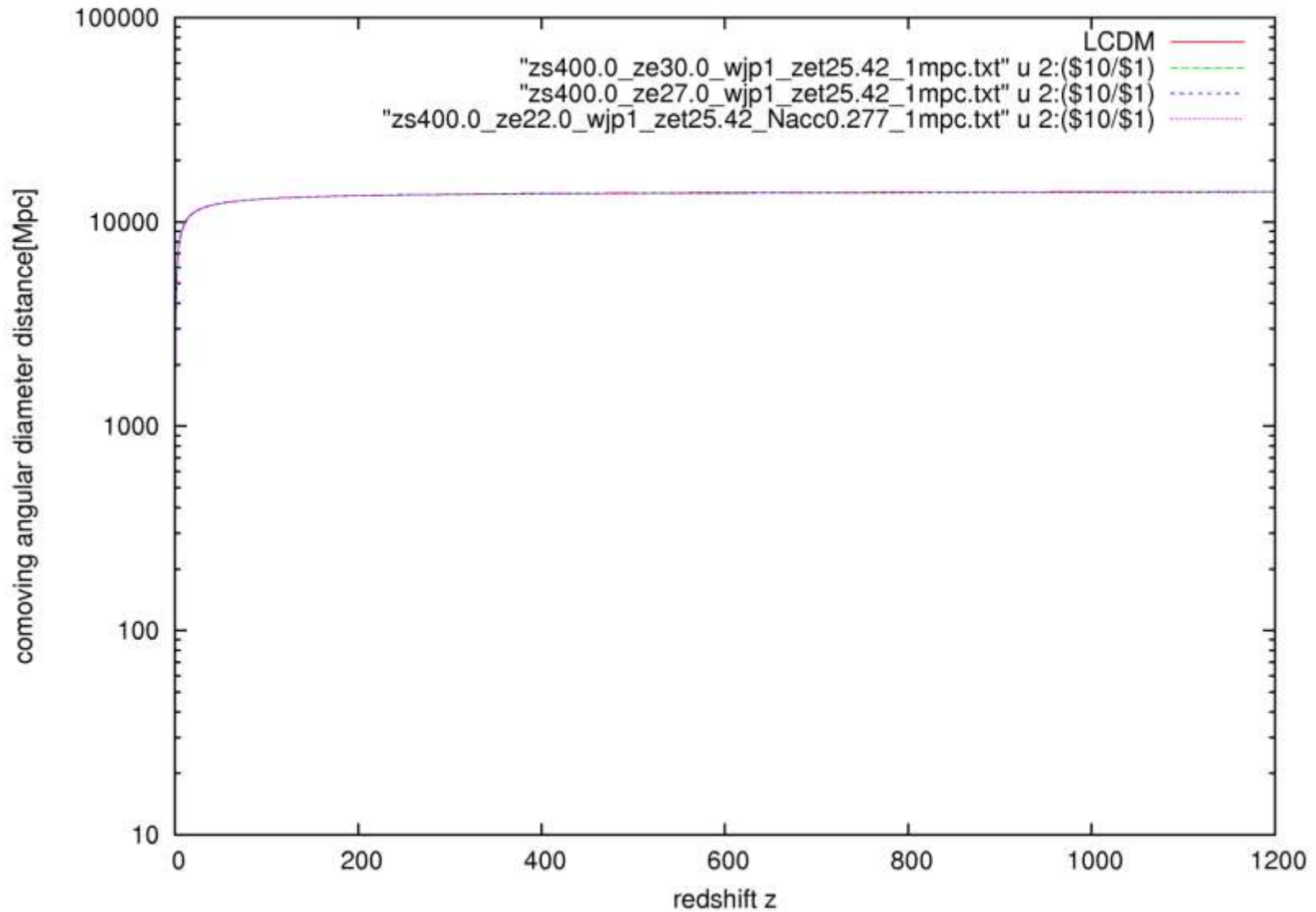
共動角径距離($z_s = 12, w_j = 1$ に固定)



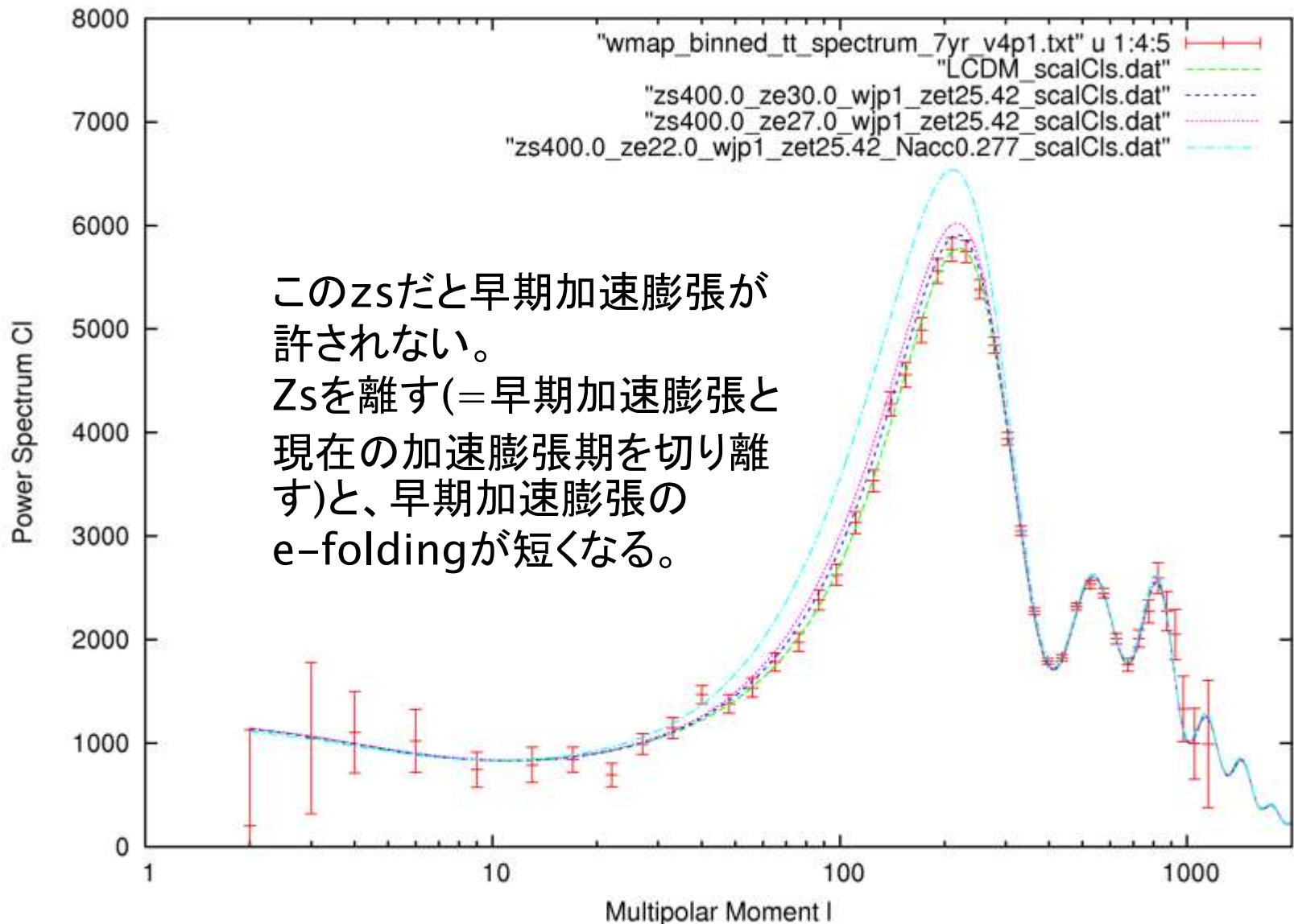
WMAP7からの制限($z_s = 12, w_j = 1$ に固定)



共動角徑距離($z_s=400, w_j=1$ に固定)



WMAP7からの制限($z_s = 400, w_j = 1$ に固定)



Conclusion&future work

- ▶ Recombination後の早期加速膨張は、現在の加速膨張期から離すほど、その長さ N_{acc} は小さくなることがわかった。
- ▶ 今回の発表でのパラメータ調整は手で行ったものを使った。現在は、MCMCを用いたパラメータ推定を行っている。これにより、早期加速膨張の可能性を詳細に探る。