

BAO:

現在の理論的到達点と 今後やるべき事、および 観測計画と将来の展望

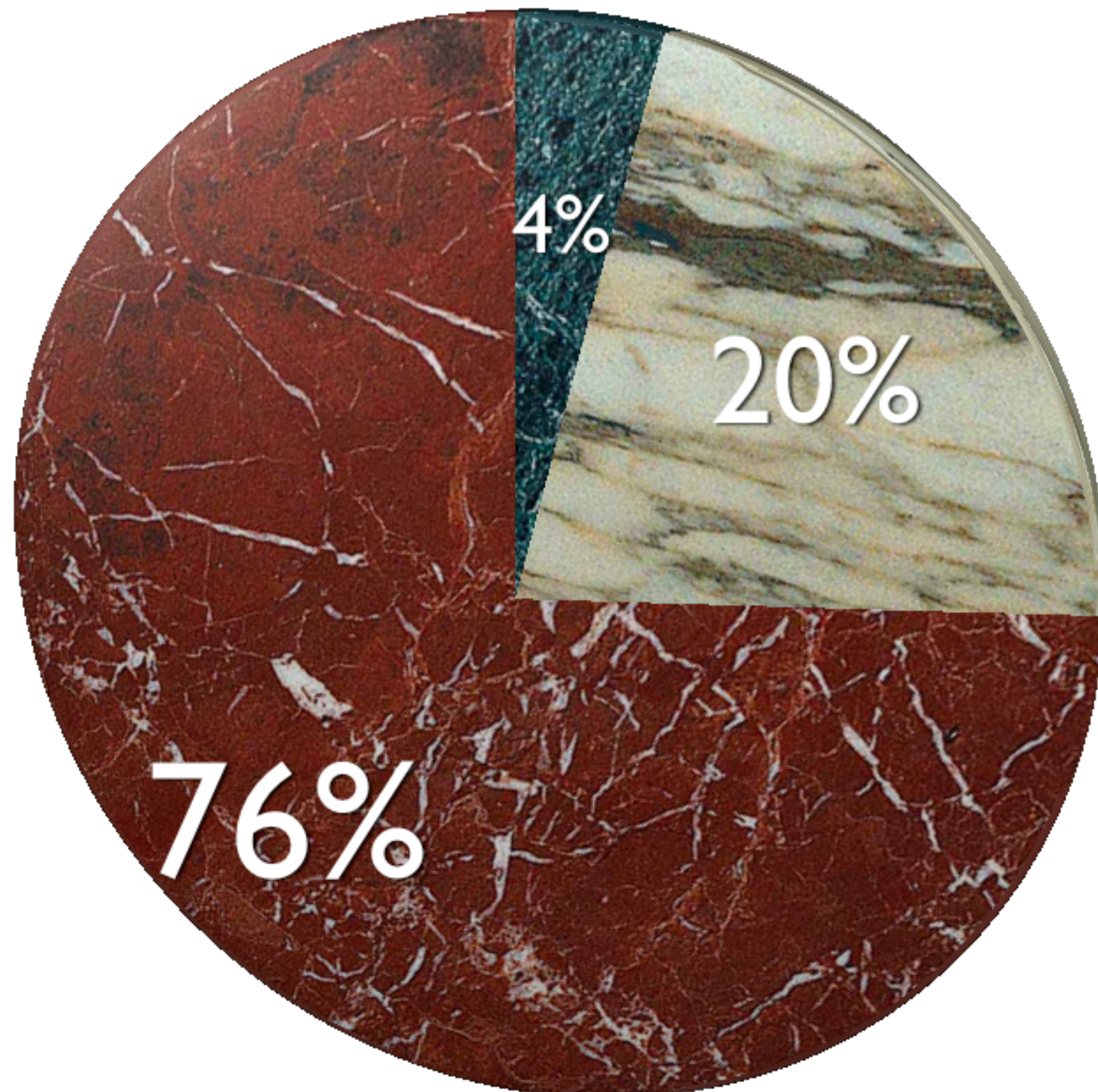
小松英一郎

テキサス大学オーステイン校

名古屋大学Atセミナー, 2007年12月19日

暗黒エネルギー

宇宙の組成表



- よく耳にするけれど・・・
- なぜ暗黒エネルギーが必要なのか？

- 水素・ヘリウム
- 暗黒物質
- 暗黒エネルギー

暗黒「エネルギー」

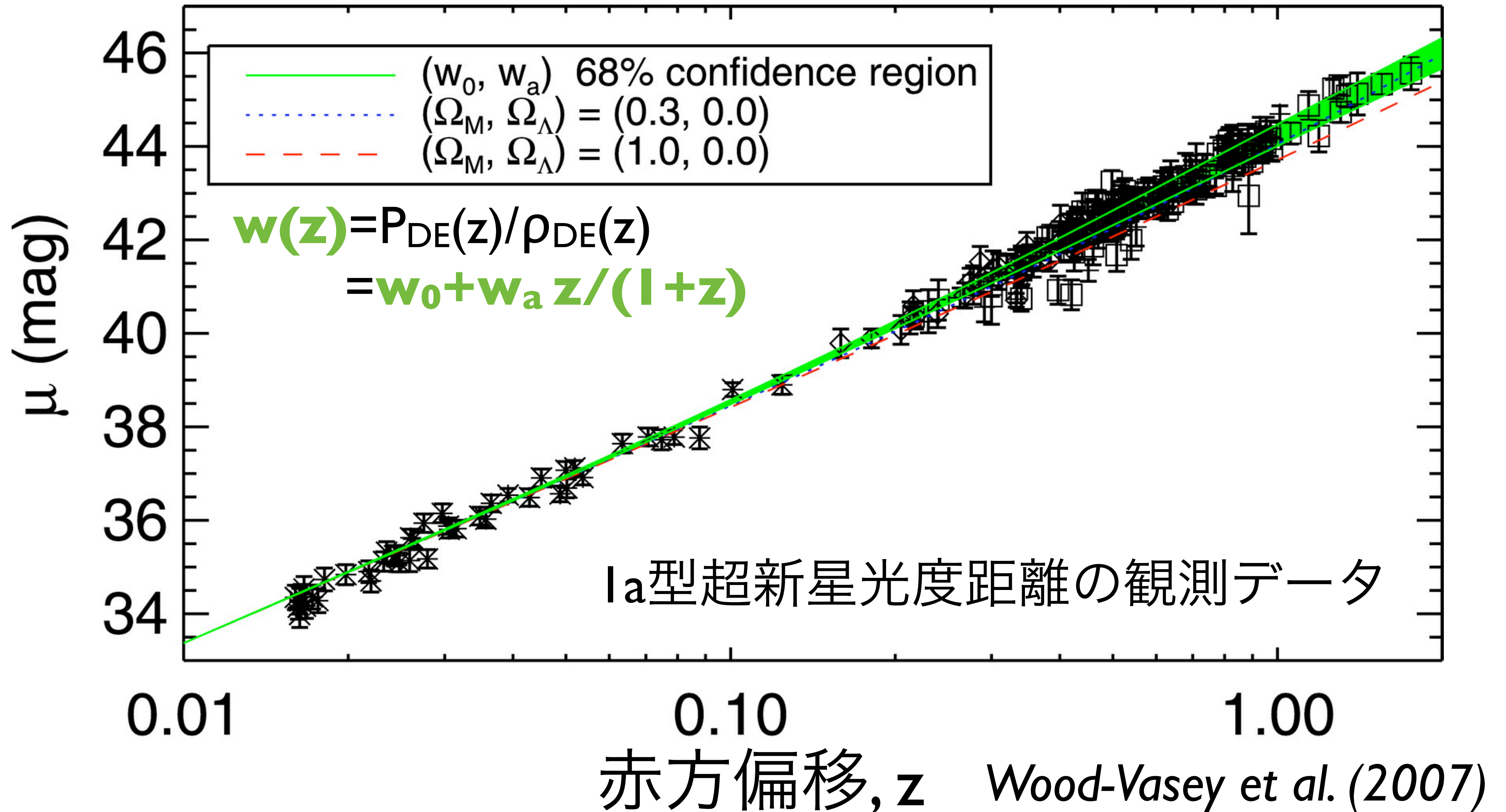
- 暗黒エネルギーは、別にエネルギーでなくて良い。
- 現在のところ、以下の観測：

(1) **光度距離** (Ia型超新星)

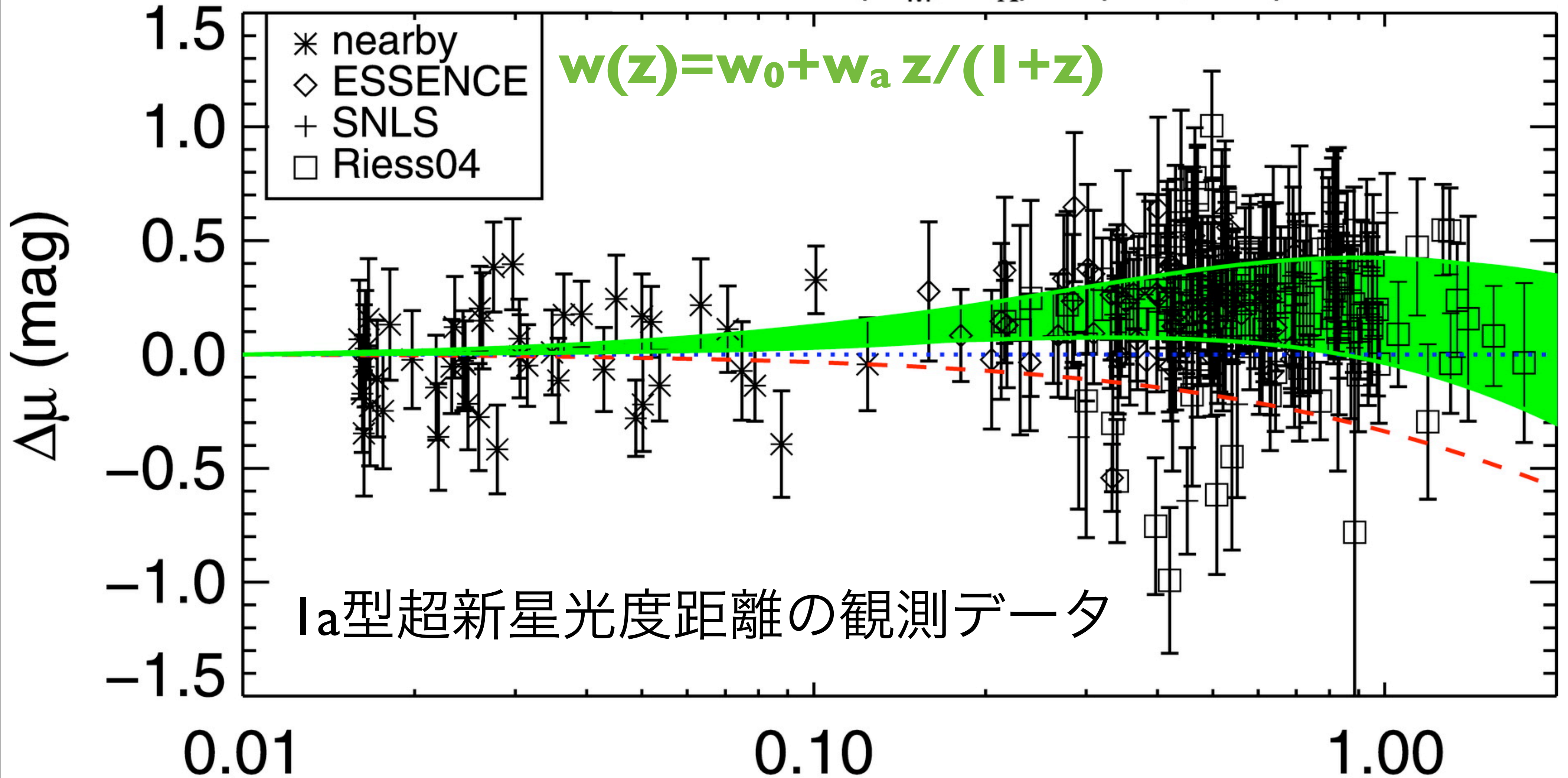
(2) **角径距離** (BAO, CMB)

が同時に説明できれば、「暗黒エネルギー」と対等に扱って良い。

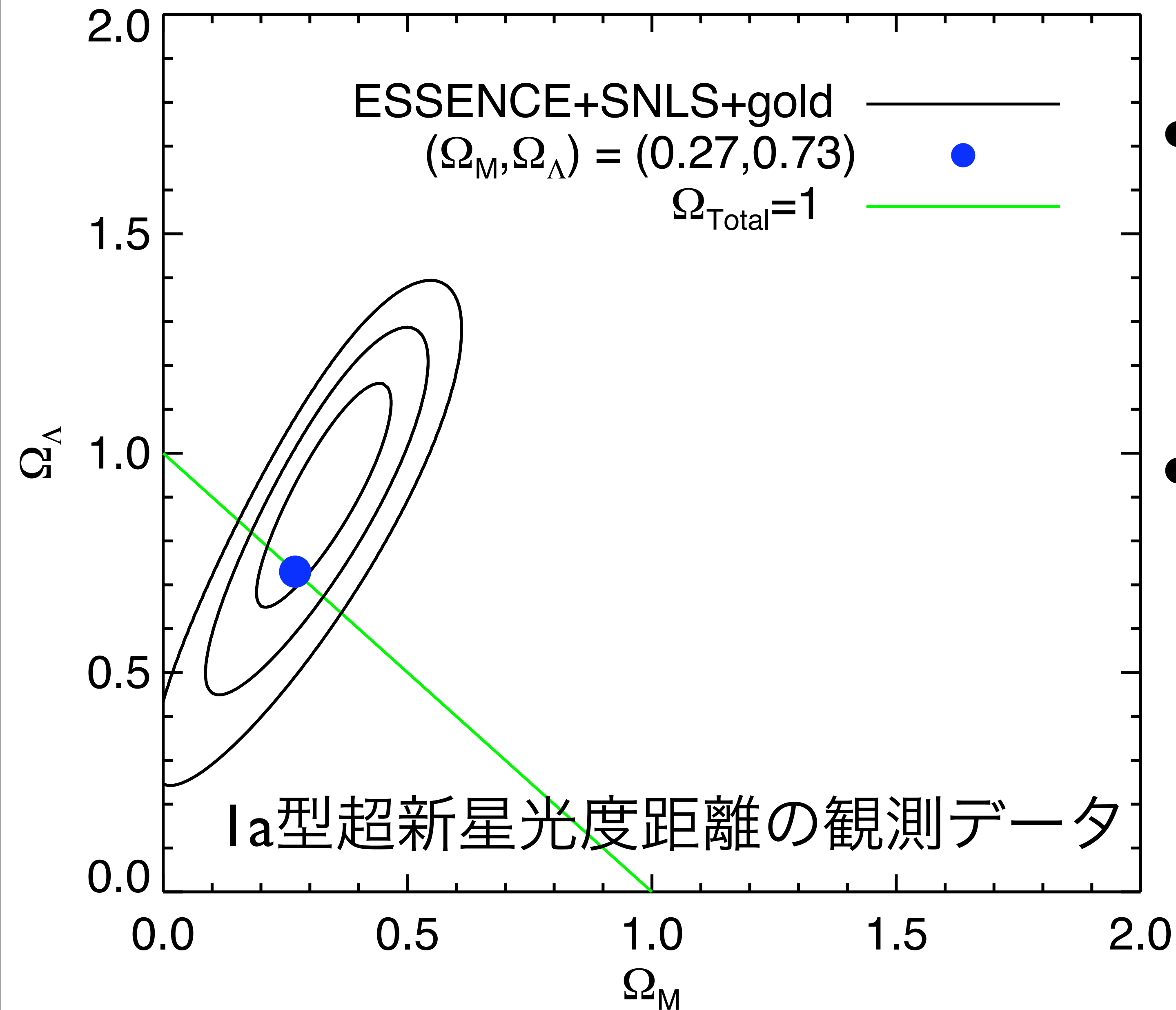
$$\mu = 5 \text{Log}_{10}[D_L(z)/\text{Mpc}] + 25$$



— (w_0, w_a) 68% confidence region
 [このモデルに対する差分] - - - $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.0)$
- - - $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (1.0, 0.0)$

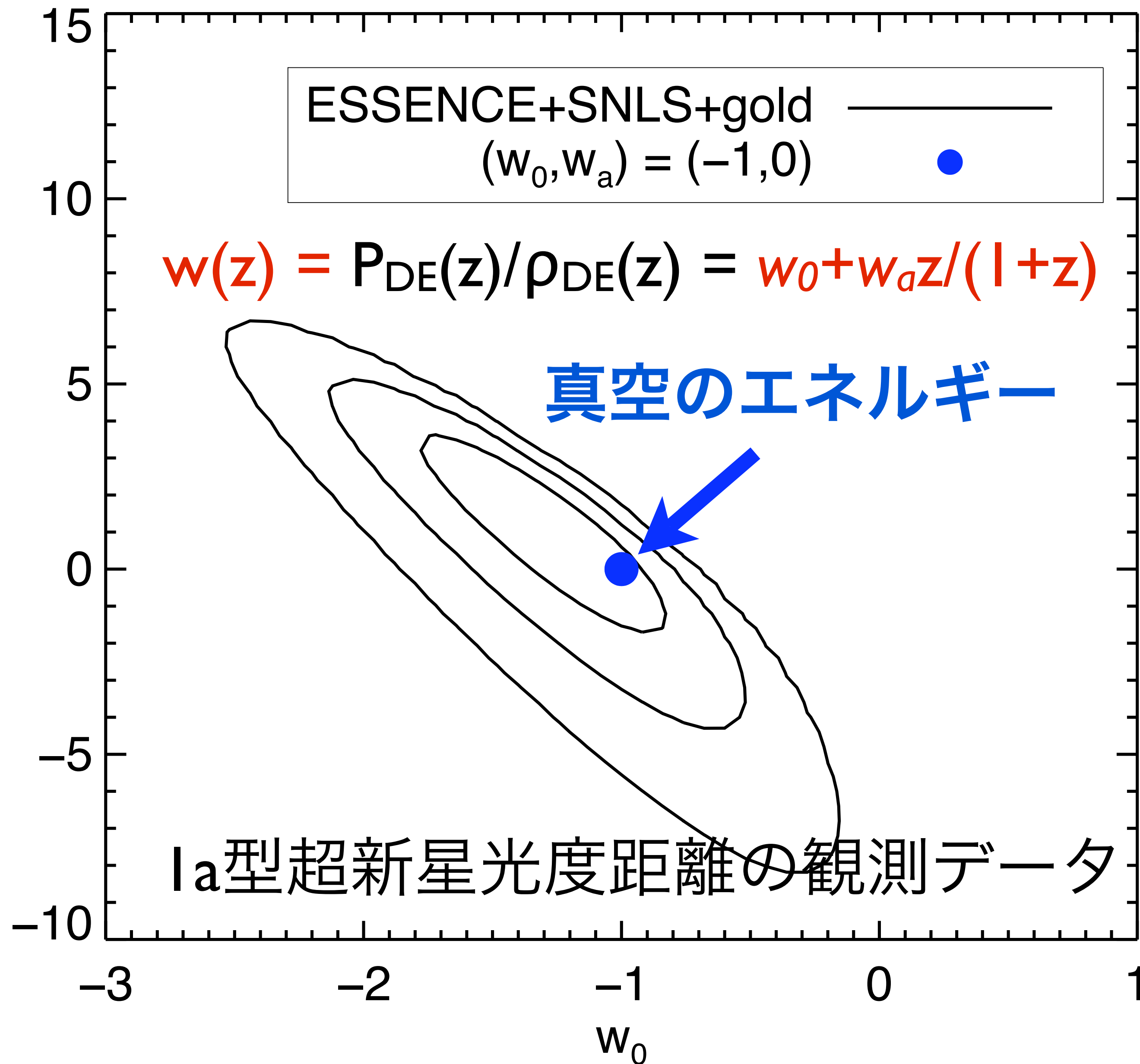


赤方偏移, z Wood-Vasey et al. (2007)



- 一般相対論に基づく標準宇宙論の枠内で考えると・・・
- 物質だけではデータを説明できないのは明白。従って、暗黒エネルギーが必要。

Wood-Vasey et al. (2007)



- 一般相対論に基づく標準宇宙論の枠内で考えると・・・
- 暗黒エネルギーは、真空のエネルギーで説明できる。
- しかし、まだ不定性は大きい。

Wood-Vasey et al. (2007)

$$D_L(z) = (1+z)^2 D_A(z)$$

$D_L(z)$

Ia型超新星

$D_A(z)$

銀河 (BAO)

CMB

0.02

0.2

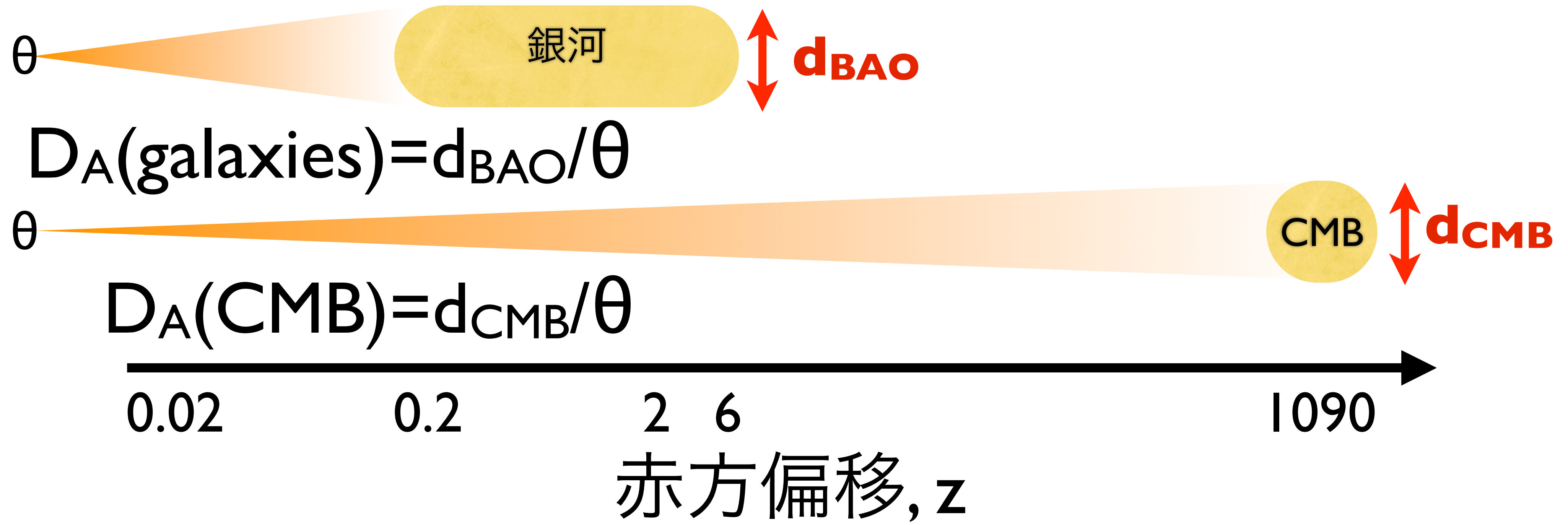
2 6

1090

赤方偏移, z

- $D_A(z)$ を測定するには、対象の物理サイズが必要。
- なにが「標準のものさし」として使えるか？

$D_A(z)$ を測る



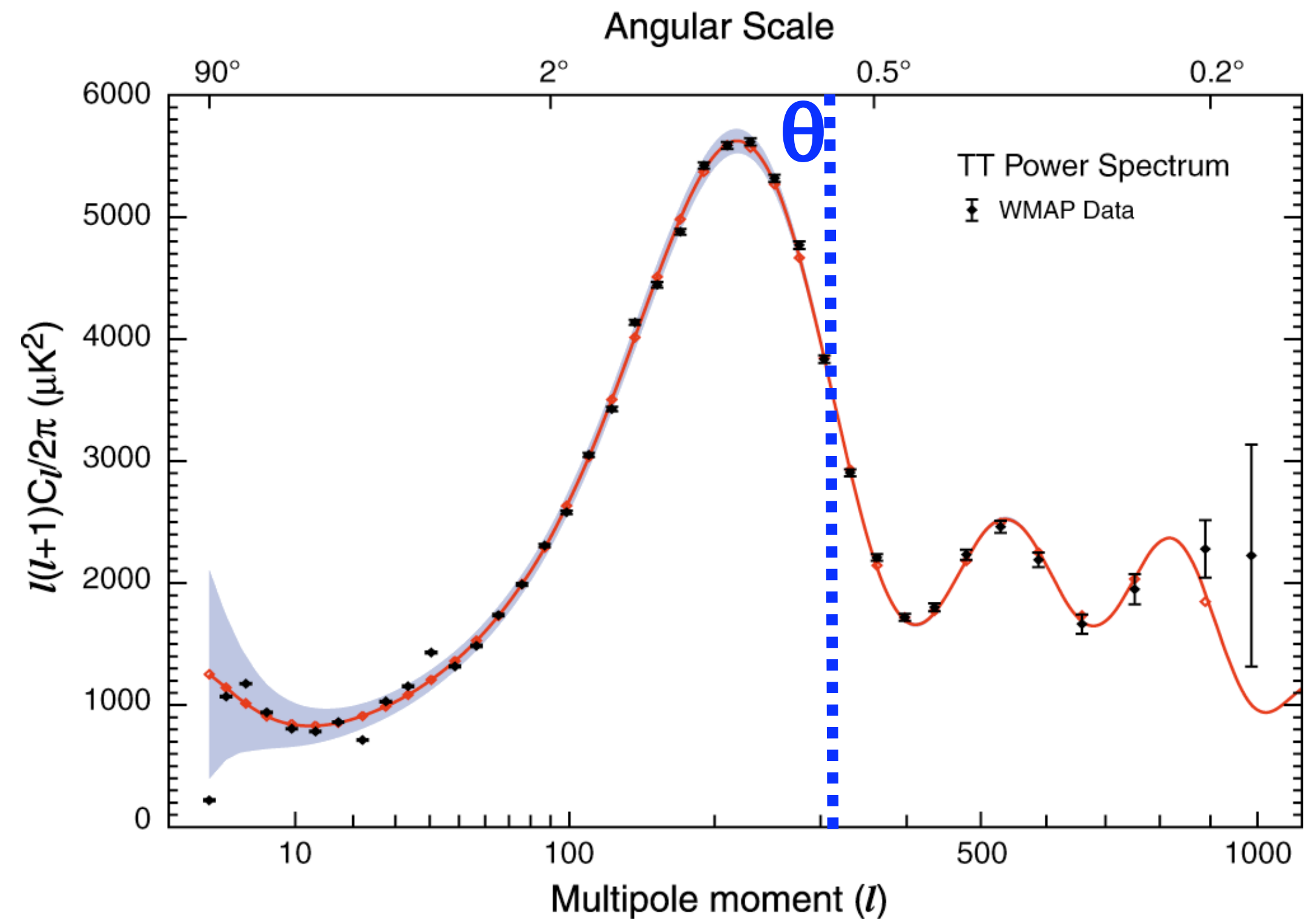
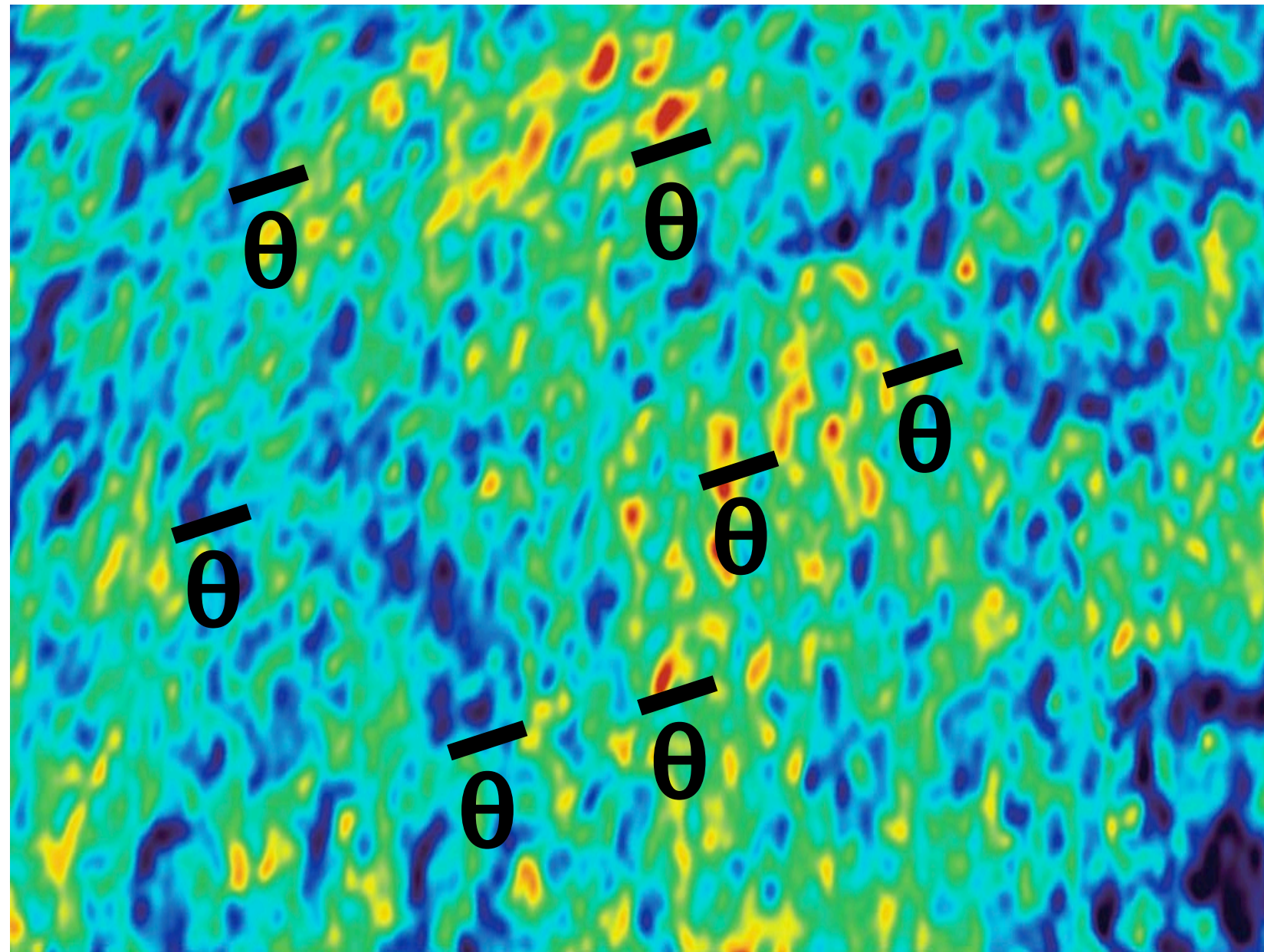
- もし対象の物理サイズ d がわかれば、 D_A を測定できる。なにが d を決めるのか？

混乱を避けるために

- $D_L(z)$ や $D_A(z)$ と書いた場合、「物理的距離」とみなす。
従って、「共動距離」はそれぞれ $(1+z)D_L(z)$ と $(1+z)D_A(z)$ で与えるとする。
- d_{CMB} や d_{BAO} と書いた場合、「物理的サイズ」とみなす。
従って、「共動サイズ」はそれぞれ $(1+z_{\text{CMB}})d_{\text{CMB}}$ と $(1+z_{\text{BAO}})d_{\text{BAO}}$ で与えるとする。
- 共動サイズを r で表した場合は、 $r_{\text{CMB}} = (1+z_{\text{CMB}})d_{\text{CMB}}$ や $r_{\text{BAO}} = (1+z_{\text{BAO}})d_{\text{BAO}}$ と書ける。

CMB = 標準もののさし

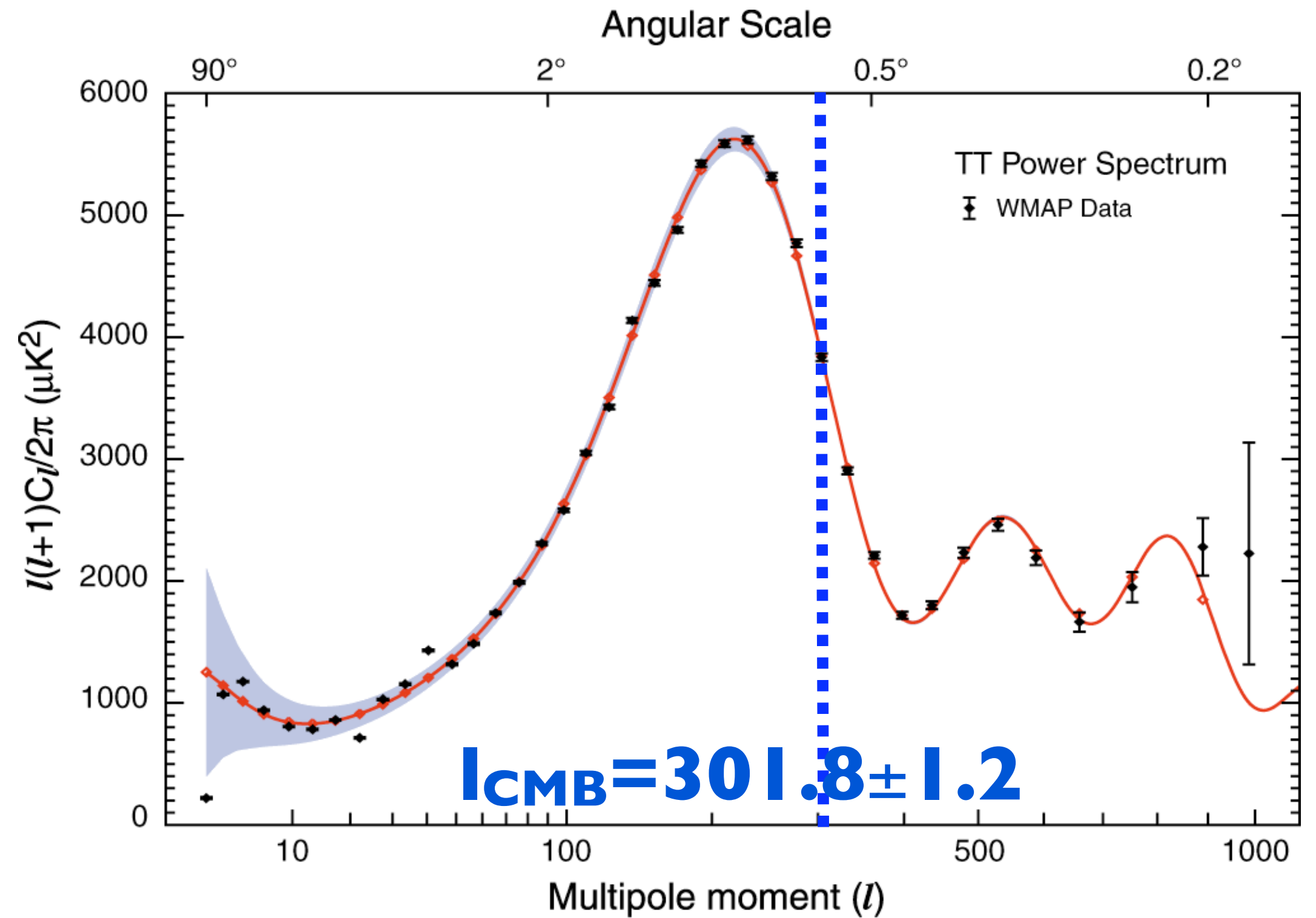
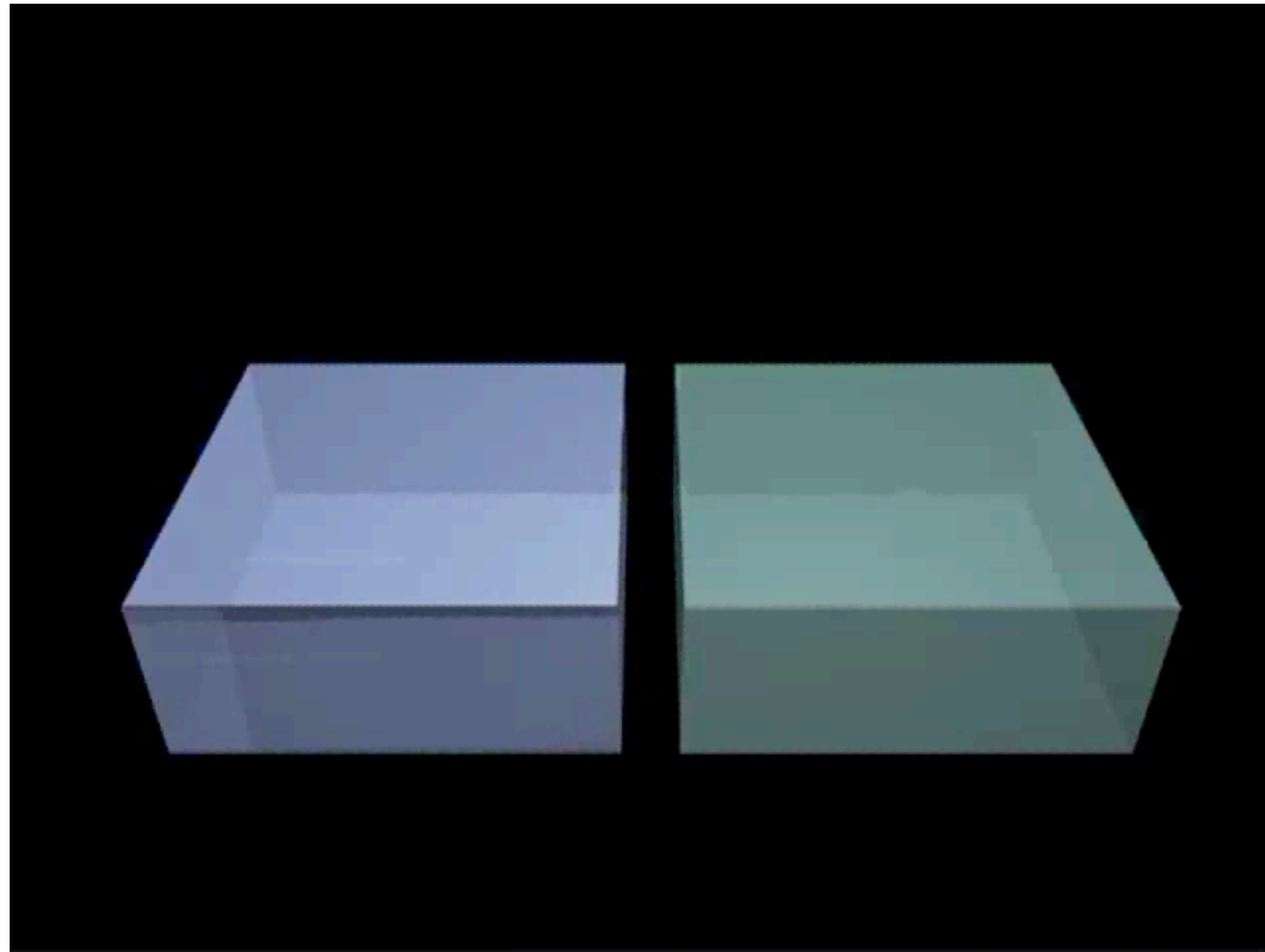
θ ~ 典型的な揺らぎのサイズ



- イメージ上で典型的な大きさ d_{CMB} があれば、それはフーリエ空間で振動となる。 d_{CMB} は何で決まる？

音波の地平線

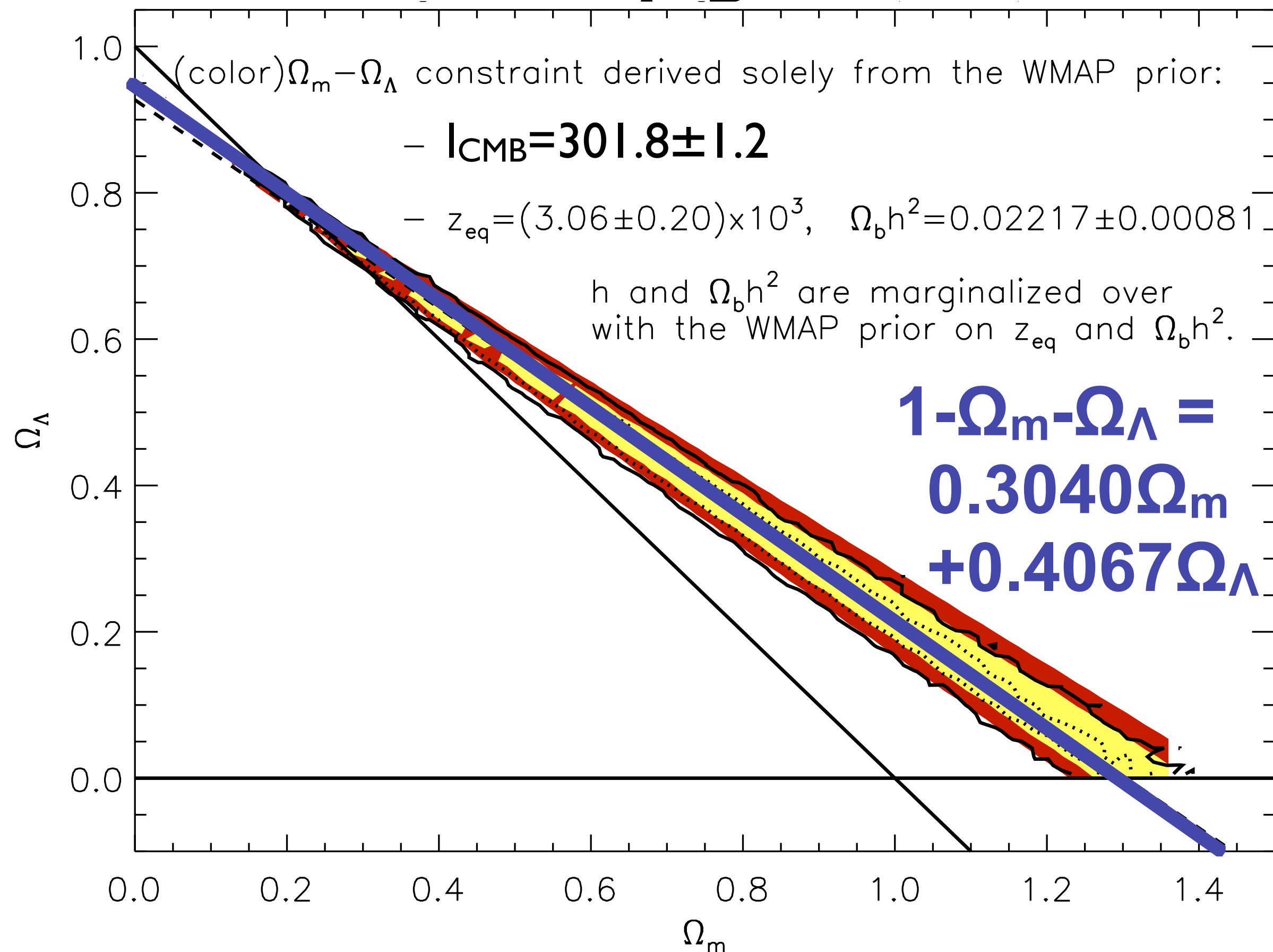
- d_{CMB} は、音波がビッグバンから宇宙の晴れ上がり t_{CMB} までに伝播した距離で決まる。 $t_{\text{CMB}} \sim 38$ 万年、おおよび $z_{\text{CMB}} \sim 1090$ 。
- 晴れ上がり t_{CMB} における 光の地平線 は
 - $d_{\text{H}}(t_{\text{CMB}}) = a(t_{\text{CMB}}) * \text{Integrate} [\mathbf{c} \, dt/a(t), \{t, 0, t_{\text{CMB}}\}]$.
- 一方、 音波の地平線 は
 - $d_{\text{s}}(t_{\text{CMB}}) = a(t_{\text{CMB}}) * \text{Integrate} [\mathbf{c}_{\text{s}}(t) \, dt/a(t), \{t, 0, t_{\text{CMB}}\}]$,
ここで $c_{\text{s}}(t)$ は **バリオン-光流体の音速**。



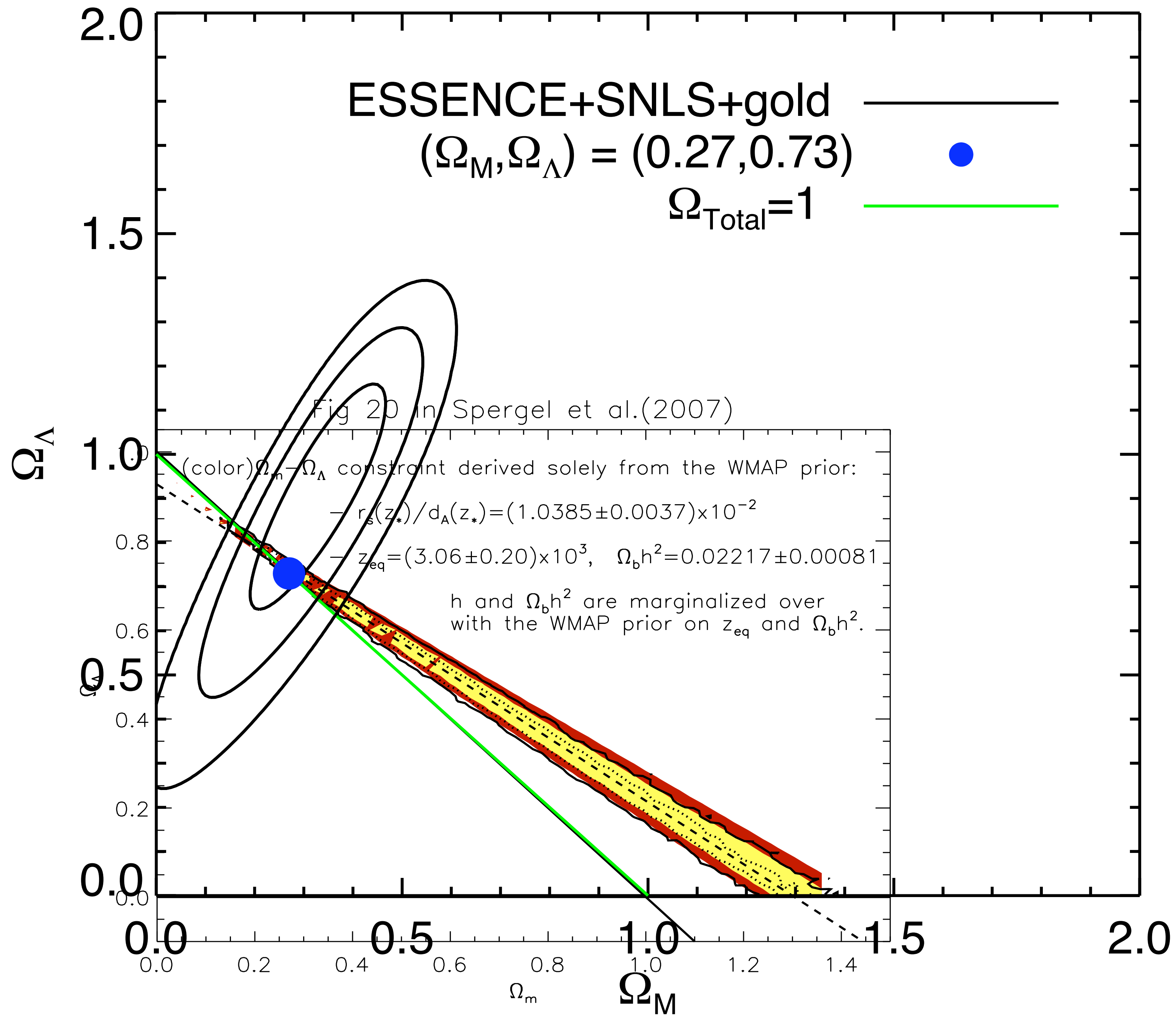
- WMAP 3年目のデータより：*Hinshaw et al. (2007)*
- $l_{\text{CMB}} = \pi/\theta = \pi D_A(z_{\text{CMB}})/d_s(z_{\text{CMB}}) = 301.8 \pm 1.2$
- CMBのデータは、 **$D_A(z_{\text{CMB}})/d_s(z_{\text{CMB}})$** を決める。

$D_A(z_{\text{CMB}})/d_s(z_{\text{CMB}})$ から

得られるもの

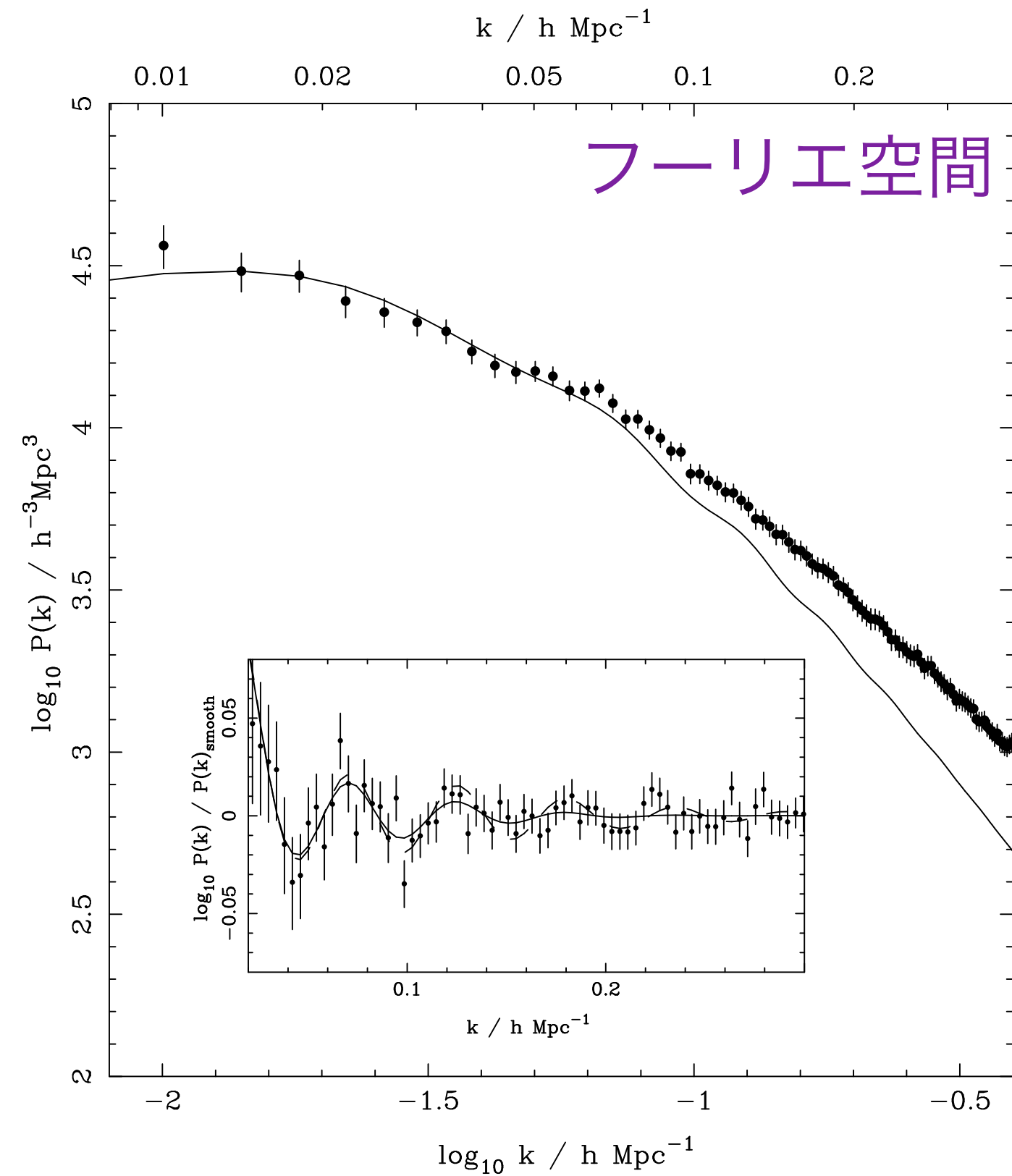
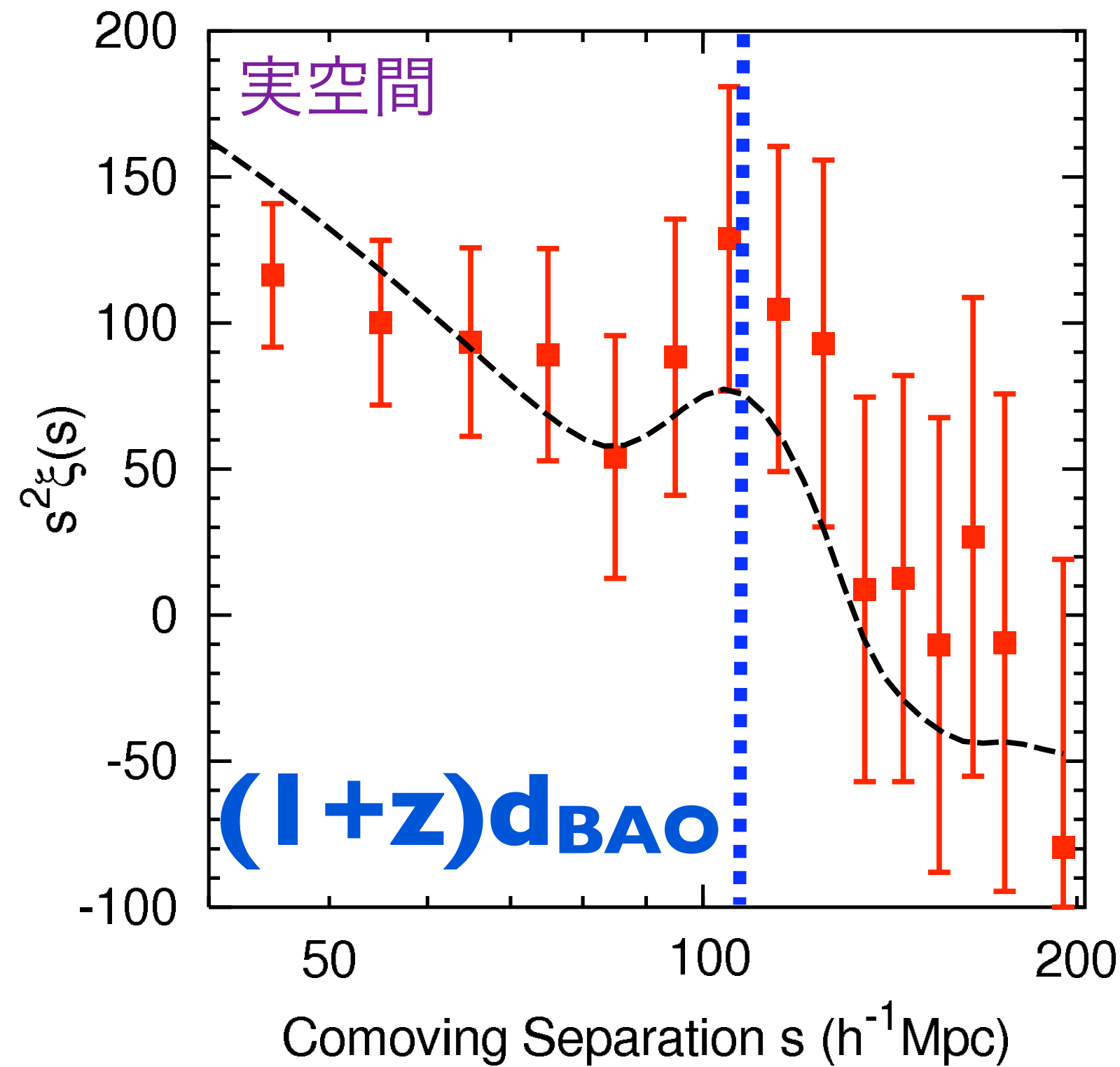


- **赤黄**: $l_{\text{CMB}} = \pi D_A(z_{\text{CMB}}) / d_s(z_{\text{CMB}})$ と z_{EQ} および $\Omega_b h^2$ から得られる制限
- 等高線: WMAPのフルの解析から得られる制限 (Spergel et al. 2007)



BAO = 標準もののさし

Okumura et al. (2007)



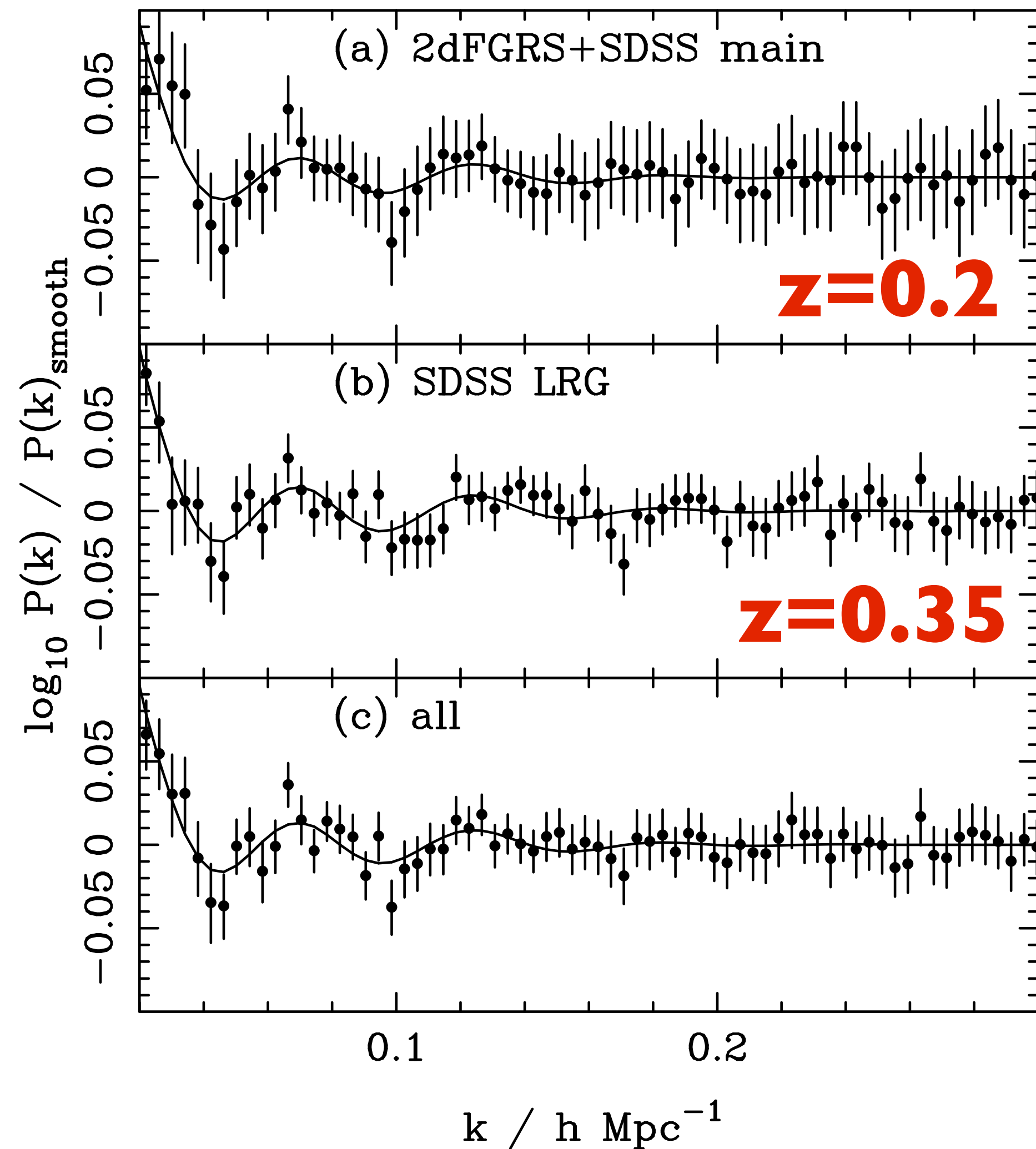
Percival et al. (2006)

- 実空間の2点相関関数で局在した構造は、フーリエ空間で振動となる。 d_{BAO} を決めるのは何か？

再び音波の地平線

- d_{BAO} は、音波がビッグバンから**バリオンの晴れ上がり** t_{BAO} までに伝播した距離で決まる。
- $z_{\text{BAO}} \sim 1080$ は光の晴れ上がり $z_{\text{CMB}} \sim 1090$ よりも遅い。
 - 実はこれはバリオンの存在量に依存する。我々の宇宙では、たまたま z_{BAO} が z_{CMB} より遅い。
 - もし、 $3\rho_{\text{baryon}}/(4\rho_{\text{photon}}) = 0.64(\Omega_{\text{b}}h^2/0.022)(1090/(1+z_{\text{CMB}}))$ が 1 より大きければ $z_{\text{BAO}} > z_{\text{CMB}}$ 。我々の宇宙では $\Omega_{\text{b}}h^2 = 0.022$ なので、 $z_{\text{BAO}} < z_{\text{CMB}}$ (ie, $d_{\text{BAO}} > d_{\text{CMB}}$)。

最新のBAO測定結果



- $z=0.2$: 2dFGRSとSDSSメインサンプル
- $z=0.35$: SDSS LRGサンプル
- これらより $D_A(z)/d_s(z_{\text{BAO}})$ が決まる。

Percival et al. (2007)

$D_A(z)$ だけでは終わらない

- BAOの真骨頂は、 $D_A(z)$ を測定できるだけでなく、各々の赤方偏移における宇宙の膨張率 $H(z)$ が直接求まる事！

- 視線方向と直交するBAOから求まるのは $D_A(z)$:

$$D_A(z) = d_s(z_{\text{BAO}})/\theta$$

- 視線方向と平行なBAOから求まるのは $H(z)$:

$$H(z) = c\Delta z / [(1+z)d_s(z_{\text{BAO}})]$$

$D_A(z)$ と $H(z)$ を測る

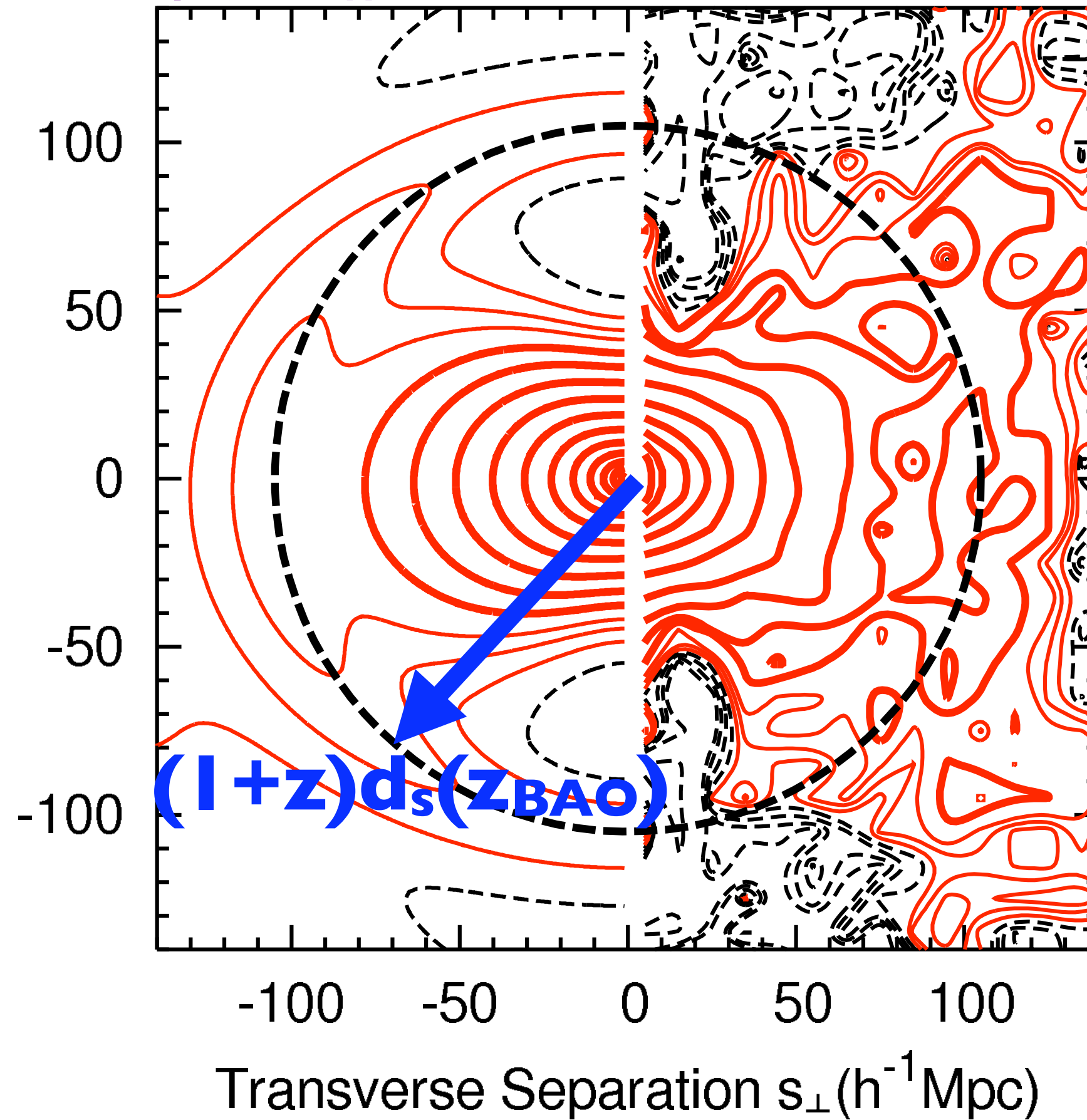
$$c\Delta z/(1+z) = d_s(z_{\text{BAO}})\mathbf{H}(\mathbf{z})$$



Line-of-Sight Separation s_{\parallel} ($h^{-1}\text{Mpc}$)

線形理論

観測データ



$(1+z)d_s(z_{\text{BAO}})$

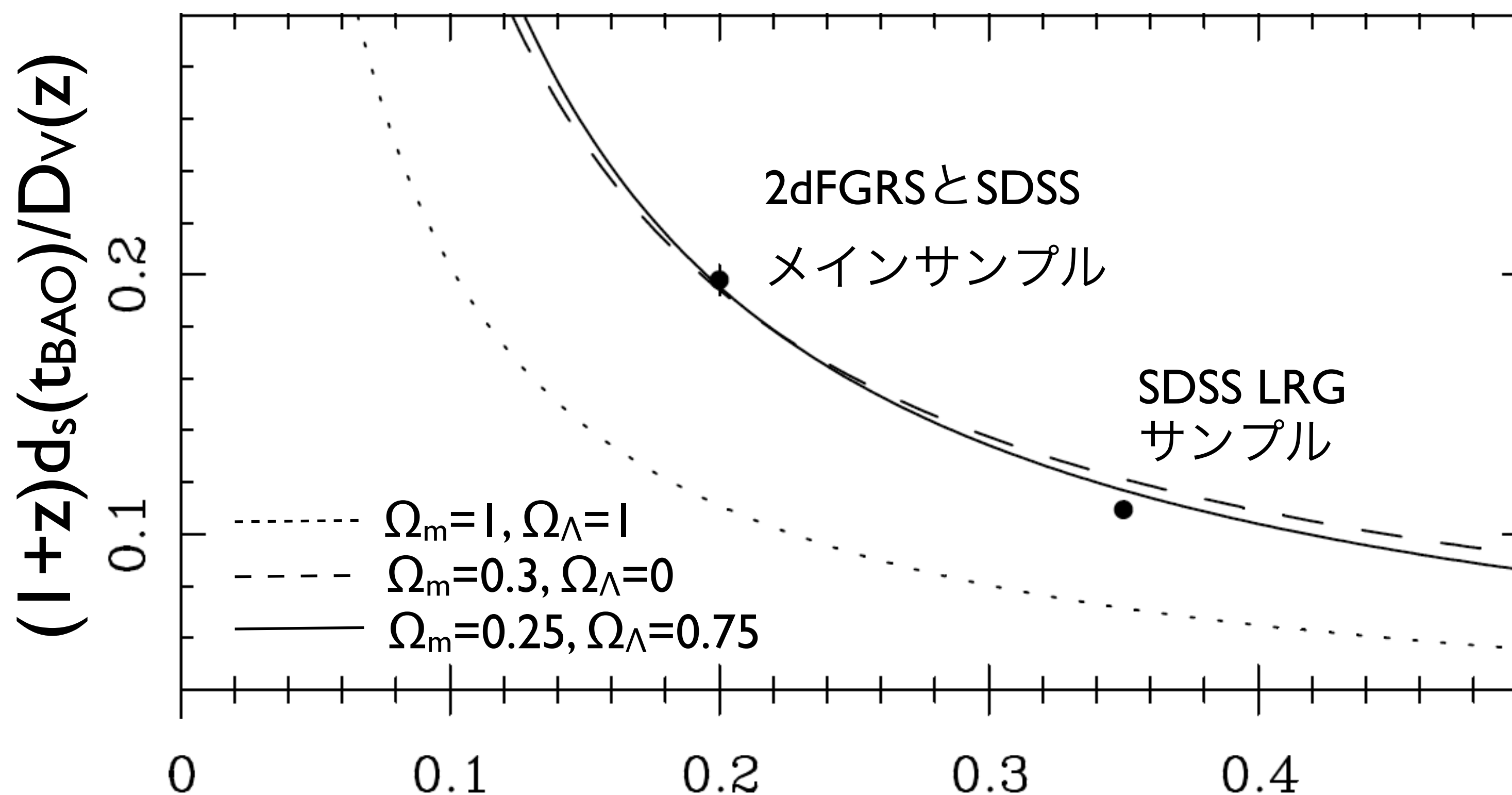
SDSS LRGサンプル
から求めた2次元の
2点相関関数
(Okumura et al. 2007)



$$\theta = d_s(z_{\text{BAO}})/\mathbf{D}_A(\mathbf{z})$$

$$D_V(z) = \left\{ (1+z)^2 D_A^2(z) [cz/H(z)] \right\}^{1/3}$$

現在のデータの精度では $D_A(z)$ と $H(z)$ を独立に決められないため、両者を組み合わせた距離 **$D_V(z)$** が測定されている。

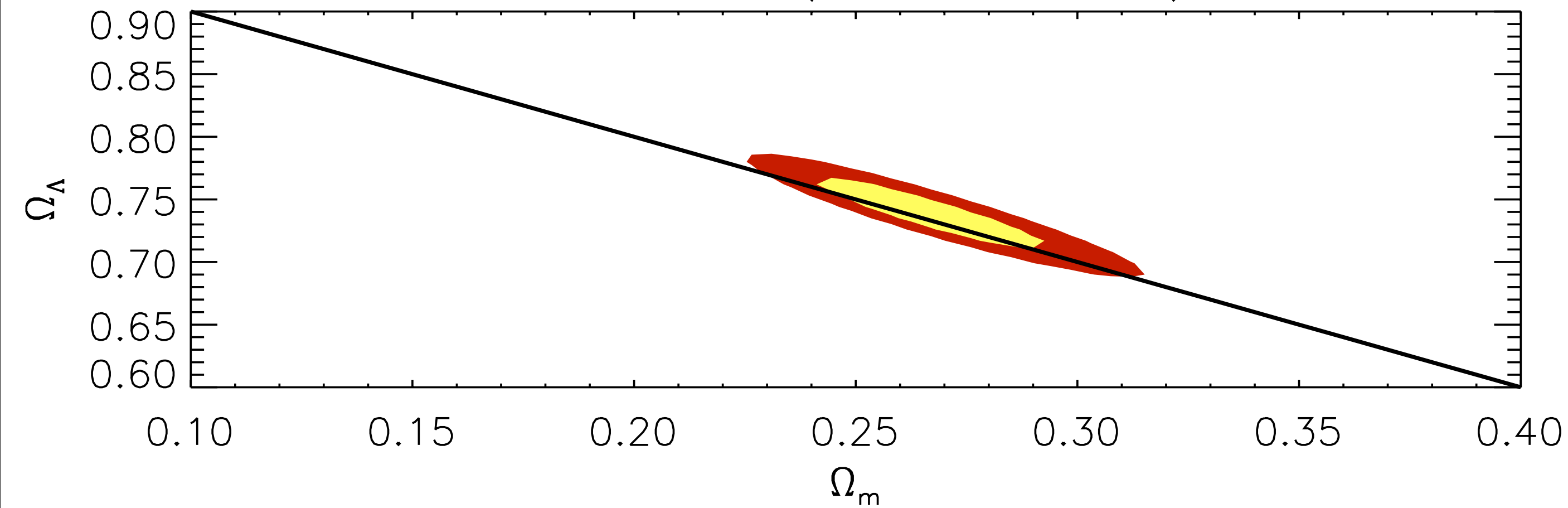


赤方偏移, z

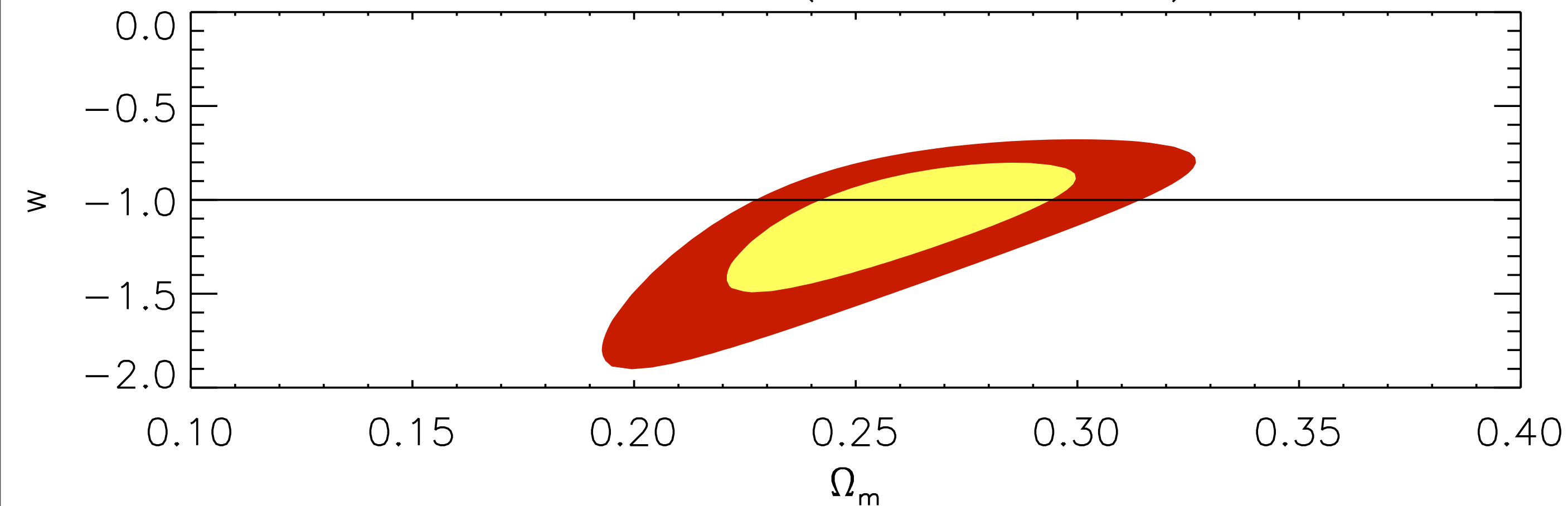
Percival et al. (2007)

CMB + BAO => 空間曲率

WMAP+BAO(Percival et al.)



WMAP+BAO(Percival et al.)

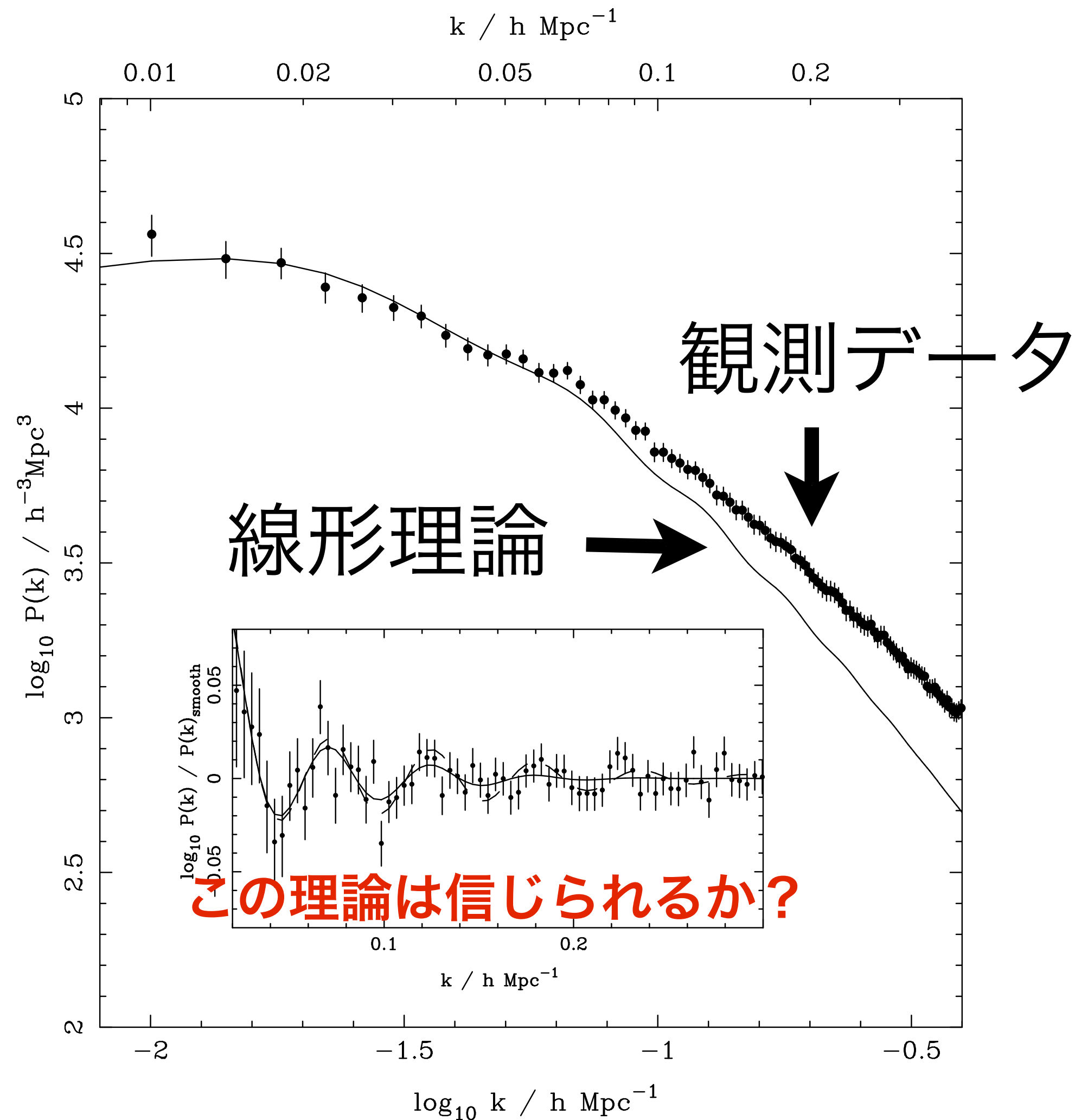


- CMBとBAOは**絶対的**な距離の指標。
- Ia超新星は**相対的**な距離の指標。
- よってCMB+BAOは空間曲率の測定に**最適**。

BAO: 現在の状況

- BAOは、既にSDSSメインとLRGサンプル、および2dFGRSから測定された。
- BAOを用いた距離決定が可能な事が観測的に証明された。(Eisenstein et al. 2005; Percival et al. 2007)
- CMBとBAOにより、空間曲率を2%以下に制限 (Spergel et al. 2007)
- BAO, CMB, とIa型超新星で暗黒エネルギーの様々な性質に制限 (大勢の研究者による)

BAO: 理論的挑戦



- 非線形, 非線形, 非線形!

1. 非線形密度揺らぎ
2. 非線形銀河バイアス
3. 非線形固有速度

• 既存の理論の精度は、将来のデータの精度に追いつけるのか?

非線形効果を理解する

- これまで良く使われてきた手法
 - N体計算の結果を再現するよう考案されたフィッティング関数を用いる
 - 経験的な「ハローモデル」を用いる

非線形効果を理解する

- 我々の手法
 - 線形摂動理論 (揺らぎの1次) の正しさは、観測的に立証済み。(WMAPを見よ!)
 - 同じ方程式系をより高次まで展開。
 - **3次の摂動理論**

3 次の摂動論は新しい？

- 新しくない。そこそこ歴史のある分野 (25年以上)
- 1990年代に勢力的に研究が進んだ。
- ところが、これまで観測データに適用されず、最近まで完全に忘れられていた。なぜだろうか？
- 現在データのある $z \sim 0$ の宇宙では、非線形が強すぎて摂動論が完全に破綻する。摂動論は理論的なオモチャと見なされ、あまり役に立たなかった・・・

なぜ今、摂動論なのか？

- 時代は変わった。
- 技術の進歩により、銀河のサーベイ観測が**高赤方偏移 ($z > 1$)**まで可能となった。
- そして今、そのようなサーベイ観測が強く求められている。BAOは Dark Energy Task Forceによって「最も系統的誤差の少ない手法」として推薦されている。
- **$z > 1$ では非線形性は弱く、摂動論が使えるはず！**

摂動論の巻き返し

- かつて摂動論を研究したが評価されず、方向性に希望も持てず挫折してしまった全ての研究者に、今こそ呼びかけたい。

帰ってきてください！

時は来ました！

解くべきは3つの方程式

- バリオンの圧力が無視できるような大きなスケールのみ考える。
- 粒子のシェルクロッシングは無視する。すなわち、粒子の速度場は回転を持たない: $\text{rot}V=0$.

- 解くべき方程式は、
$$\dot{\delta} + \nabla \cdot [(1 + \delta)\mathbf{v}] = 0$$

$$\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\dot{a}}{a} \mathbf{v} - \nabla \phi$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G a^2 \bar{\rho} \delta$$

フーリエ変換すると、

$$\begin{aligned} & \dot{\delta}(\mathbf{k}, \tau) + \theta(\mathbf{k}, \tau) \\ = & - \int \frac{d^3 k_1}{(2\pi)^3} \int d^3 k_2 \delta_D(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}) \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{k}_1}{k_1^2} \delta(\mathbf{k}_2, \tau) \theta(\mathbf{k}_1, \tau), \\ & \dot{\theta}(\mathbf{k}, \tau) + \frac{\dot{a}}{a} \theta(\mathbf{k}, \tau) + \frac{3\dot{a}^2}{2a^2} \Omega_m(\tau) \delta(\mathbf{k}, \tau) \\ = & - \int \frac{d^3 k_1}{(2\pi)^3} \int d^3 k_2 \delta_D(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}) \frac{k^2 (\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_2)}{2k_1^2 k_2^2} \theta(\mathbf{k}_1, \tau) \theta(\mathbf{k}_2, \tau) \end{aligned}$$

- ここで、 $\theta = \nabla \cdot \mathbf{v}$ は速度場の発散。

δ_1 に関してテイラー展開

- δ_1 は 1 次の摂動 (線形摂動)

$$\delta(\mathbf{k}, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} a^n(\tau) \int \frac{d^3 q_1}{(2\pi)^3} \cdots \frac{d^3 q_{n-1}}{(2\pi)^3} \int d^3 q_n \delta_D\left(\sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i - \mathbf{k}\right) F_n(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \cdots, \mathbf{q}_n) \delta_1(\mathbf{q}_1) \cdots \delta_1(\mathbf{q}_n),$$

$$\theta(\mathbf{k}, \tau) = - \sum_{n=1}^{\infty} \dot{a}(\tau) a^{n-1}(\tau) \int \frac{d^3 q_1}{(2\pi)^3} \cdots \frac{d^3 q_{n-1}}{(2\pi)^3} \int d^3 q_n \delta_D\left(\sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i - \mathbf{k}\right) G_n(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \cdots, \mathbf{q}_n) \delta_1(\mathbf{q}_1) \cdots \delta_1(\mathbf{q}_n)$$

3 次の項(δ_1^3)までキープ

- $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ と書く。ここで $\delta_2 = O(\delta_1^2)$, $\delta_3 = O(\delta_1^3)$.
- パワースペクトル, $P(\mathbf{k}) = \mathbf{P}_L(\mathbf{k}) + \mathbf{P}_{22}(\mathbf{k}) + 2\mathbf{P}_{13}(\mathbf{k})$, は以下のようにオーダー毎に分割して書く。

$$\begin{aligned} & (2\pi)^3 P(\mathbf{k}) \delta_D(\mathbf{k} + \mathbf{k}') \\ & \equiv \langle \delta(\mathbf{k}, \tau) \delta(\mathbf{k}', \tau) \rangle \\ & = \underbrace{\langle \delta_1(\mathbf{k}, \tau) \delta_1(\mathbf{k}', \tau) \rangle}_{\mathbf{P}_L} + \underbrace{\langle \delta_2(\mathbf{k}, \tau) \delta_1(\mathbf{k}', \tau) + \delta_1(\mathbf{k}, \tau) \delta_2(\mathbf{k}', \tau) \rangle}_{\text{Odd powers in } \delta_1 \text{ vanish (Gaussianity)}} \\ & \quad + \underbrace{\langle \delta_1(\mathbf{k}, \tau) \delta_3(\mathbf{k}', \tau) + \delta_2(\mathbf{k}, \tau) \delta_2(\mathbf{k}', \tau) + \delta_3(\mathbf{k}, \tau) \delta_1(\mathbf{k}', \tau) \rangle}_{\mathbf{P}_{13} \quad \mathbf{P}_{22} \quad \mathbf{P}_{13}} \\ & \quad + O(\delta_1^6) \end{aligned}$$

Vishniac (1983); Fry (1984); Goroff et al. (1986); Suto&Sasaki (1991);
Makino et al. (1992); Jain&Bertschinger (1994); Scoccimarro&Frieman (1996)

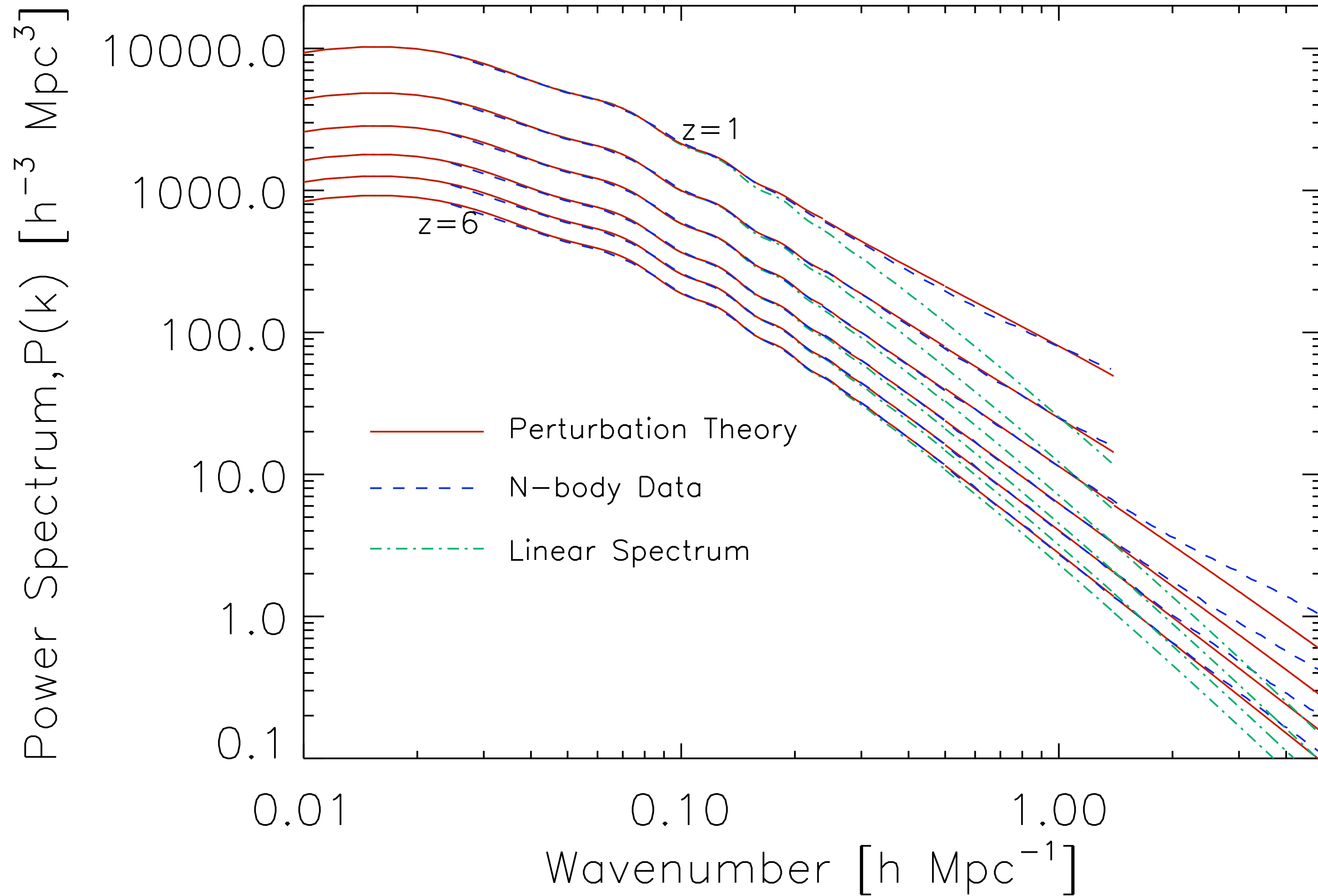
$P(k)$: 3 次の摂動論の解

$$P_{22}(k) = 2 \int \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} P_L(q) P_L(|\mathbf{k} - \mathbf{q}|) \left[F_2^{(s)}(\mathbf{q}, \mathbf{k} - \mathbf{q}) \right]^2$$

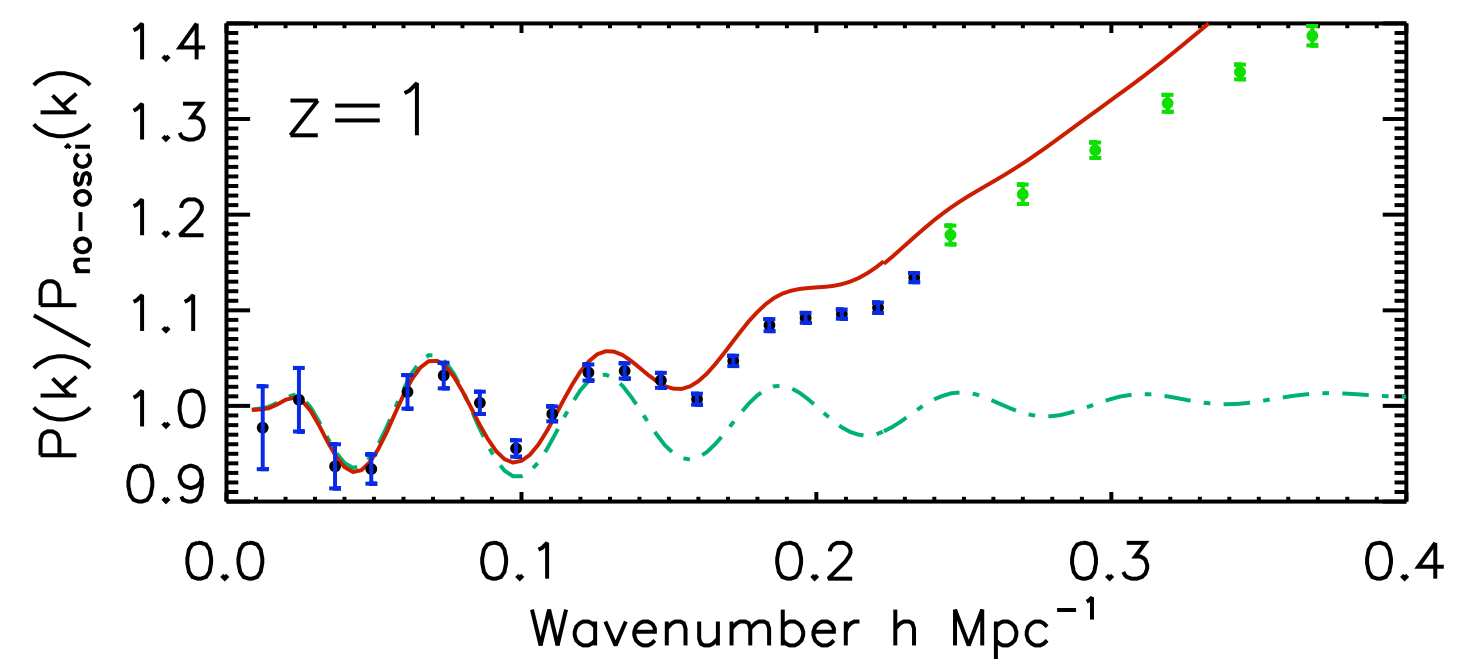
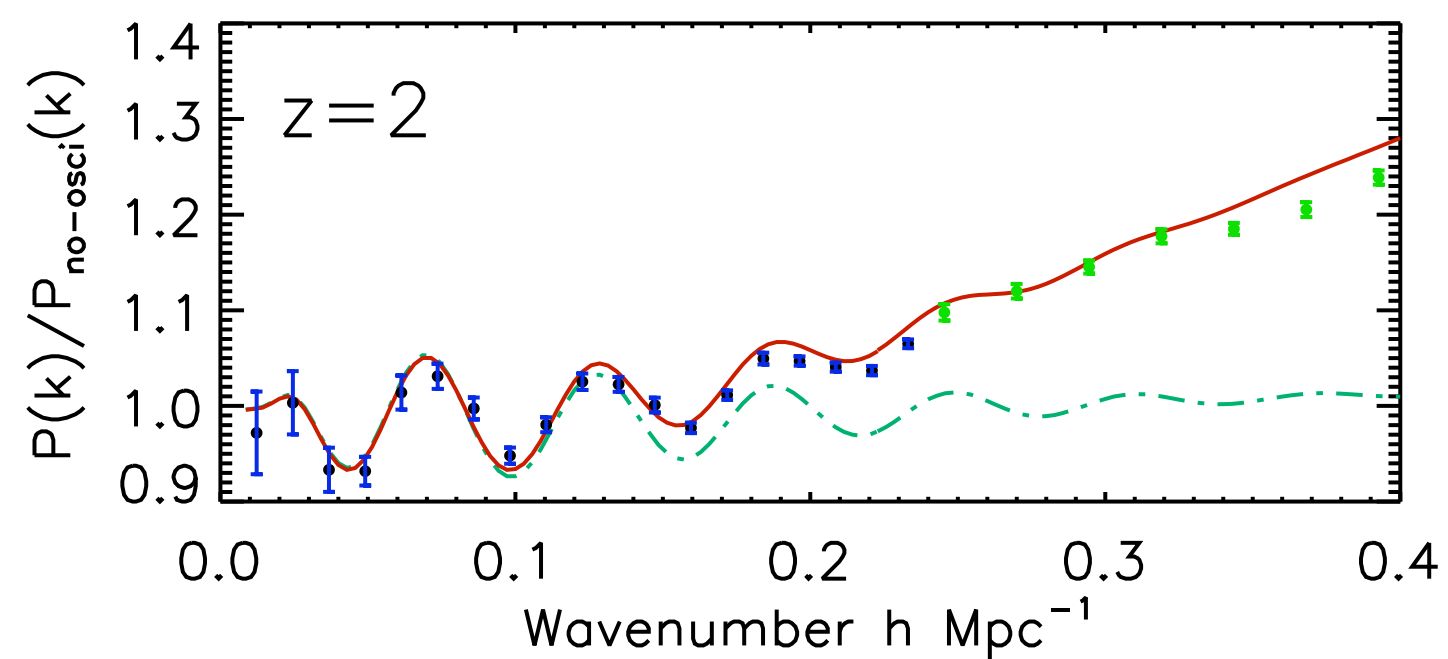
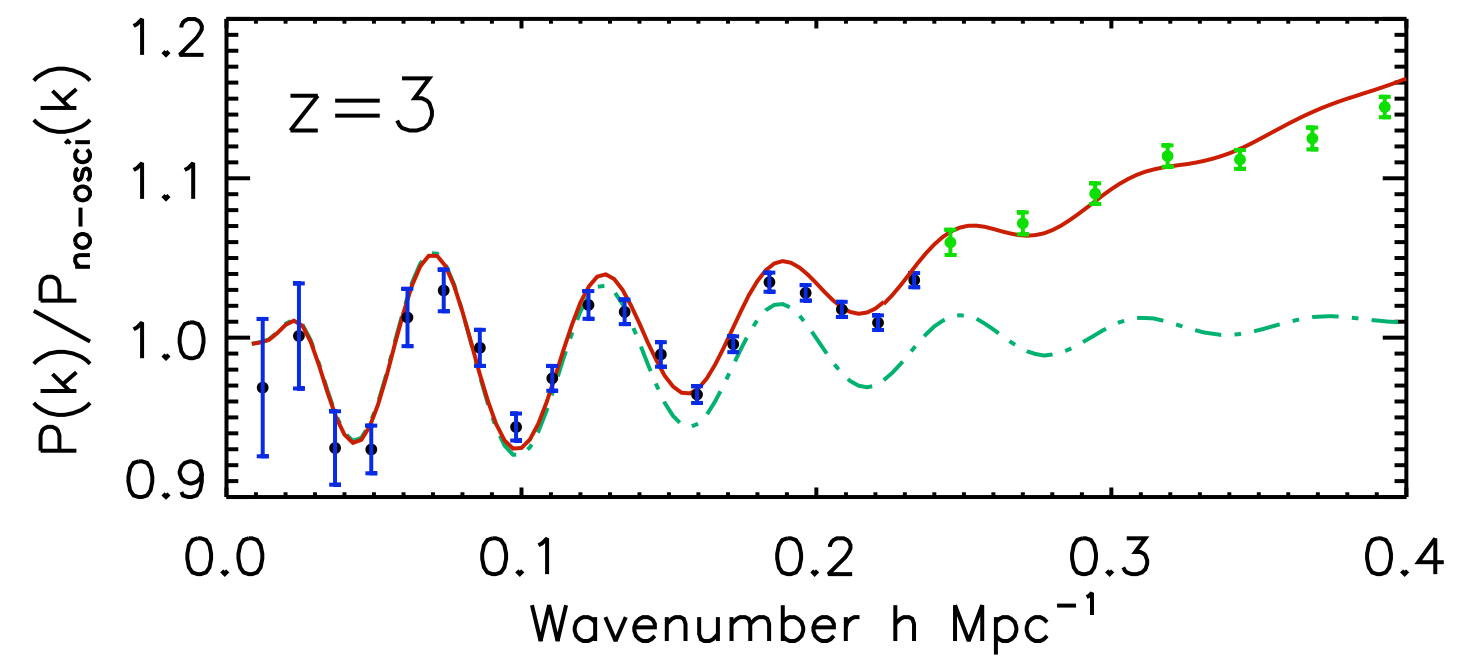
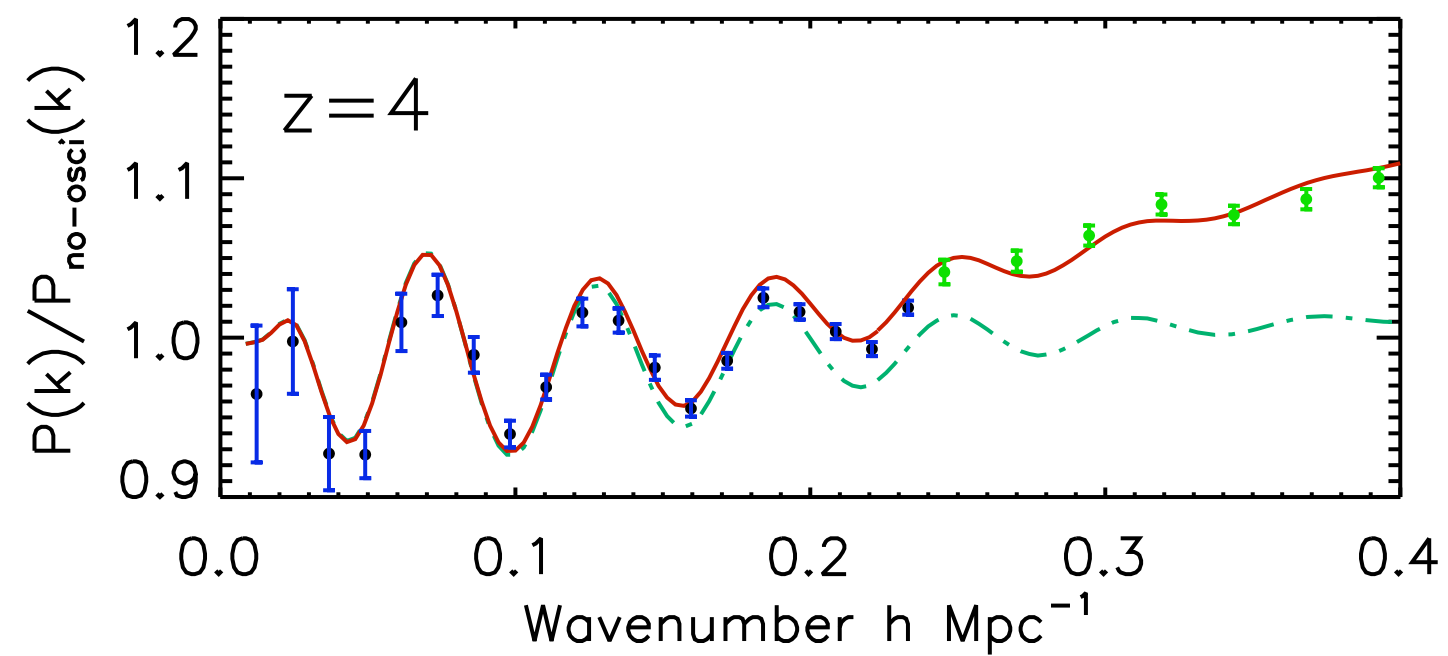
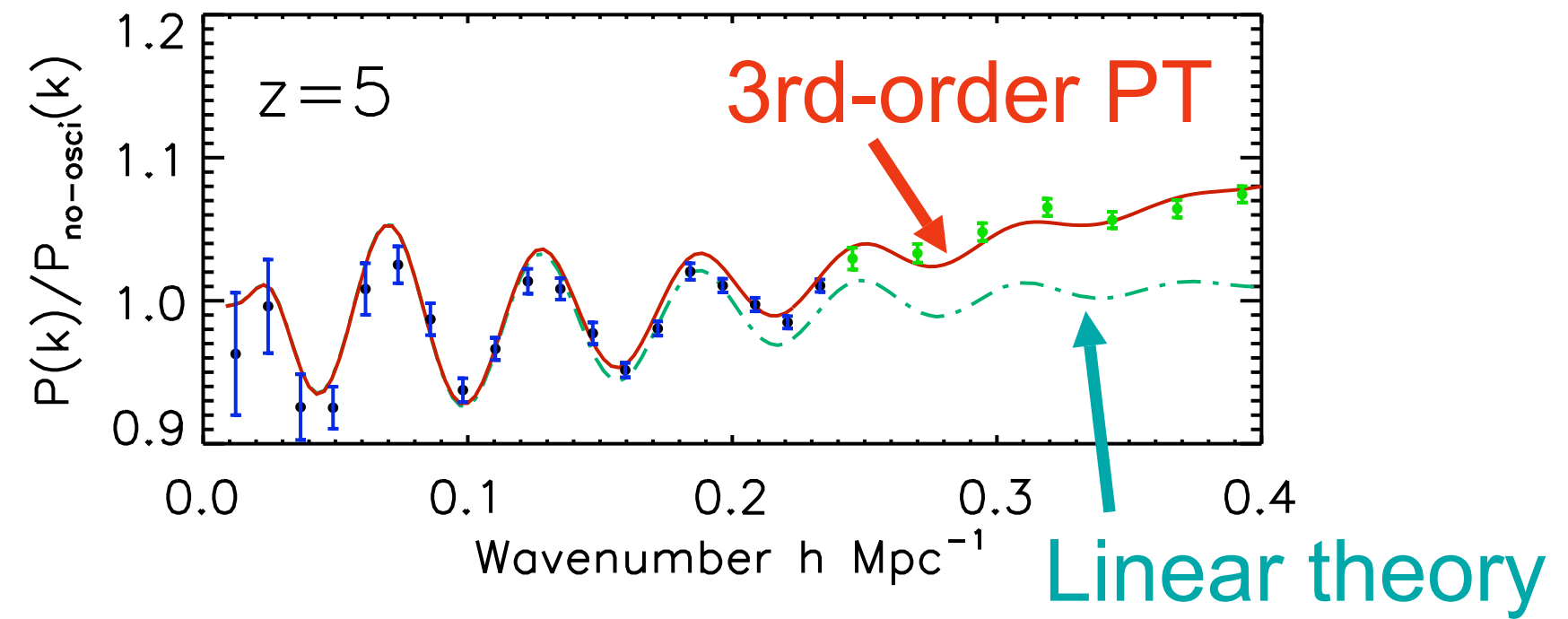
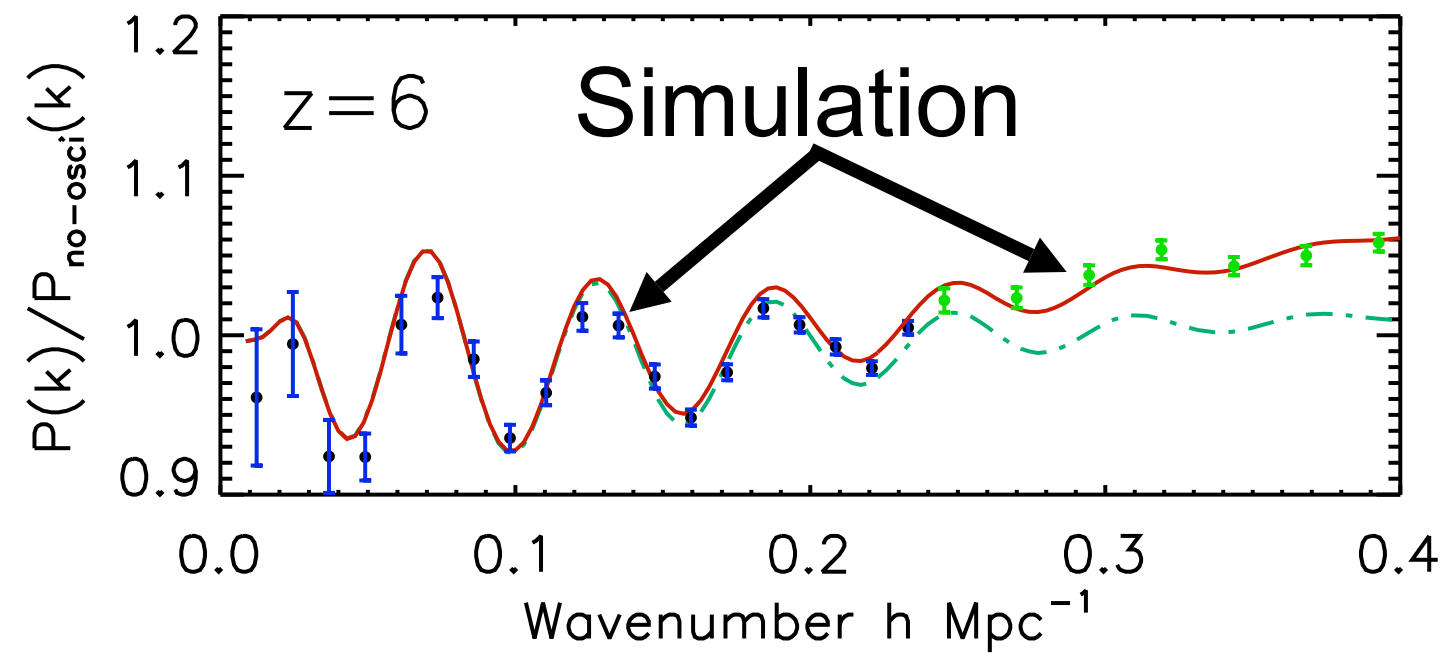
$$\begin{aligned} 2P_{13}(k) &= \frac{2\pi k^2}{252} P_L(k) \int_0^\infty \frac{dq}{(2\pi)^3} P_L(q) \\ &\times \left[100 \frac{q^2}{k^2} - 158 + 12 \frac{k^2}{q^2} - 42 \frac{q^4}{k^4} \right. \\ &\left. + \frac{3}{k^5 q^3} (q^2 - k^2)^3 (2k^2 + 7q^2) \ln \left(\frac{k+q}{|k-q|} \right) \right] \end{aligned}$$

- $F_2^{(s)}$ は既知の関数 (Goroff et al. 1986)

3 次の摂動論 vs N体計算



BAO: 非線形効果



P. McDonald (2006)の引用

“...this perturbative approach to the galaxy power spectrum (including beyond-linear corrections) has not to my knowledge actually been used to interpret real data. However, between improvements in perturbation theory and the need to interpret increasingly precise observations, **the time for this kind of approach may have arrived** (Jeong & Komatsu, 2006).”

でも、銀河は？

- 我々が測定するのは「銀河」のパワースペクトル
 - 「物質」のパワースペクトルが何の役に立つと
言うのか？
- どうやって摂動論を銀河のパワースペクトルに拡張すれば良いのだろうか？

局在銀河形成仮定

- 銀河の分布は物質の分布と完全には一致せず、あるバイアスのかかった分布を持つ。
- 大抵これは「線形バイアス」として $P_g(k)=b_1^2 P(k)$ のようにモデル化される。 b_1 は定数。
- どうやってこれを非線形な形に拡張するか？
- 仮定: **銀河形成は局在した物理過程**。少なくとも、我々が興味あるスケールでは成立するとみなす。

δ_g を δ でテイラー展開する

$$\delta_g(\mathbf{x}) = c_1\delta(\mathbf{x}) + c_2\delta^2(\mathbf{x}) + c_3\delta^3(\mathbf{x}) + O(\delta^4) + \varepsilon(\mathbf{x})$$

ここで δ は非線形な物質揺らぎ、 ε は物質揺らぎとは相関を持たない「ノイズ」： $\langle\delta(\mathbf{x})\varepsilon(\mathbf{x})\rangle=0$.

- 両辺とも同じ空間地点 \mathbf{x} で定義される事から、局在した銀河形成を仮定しているのがわかる。
- 局在仮定は必ずどこかで破れるが、破れないスケールのみ扱う、というスタンス。

銀河のパワースペクトル

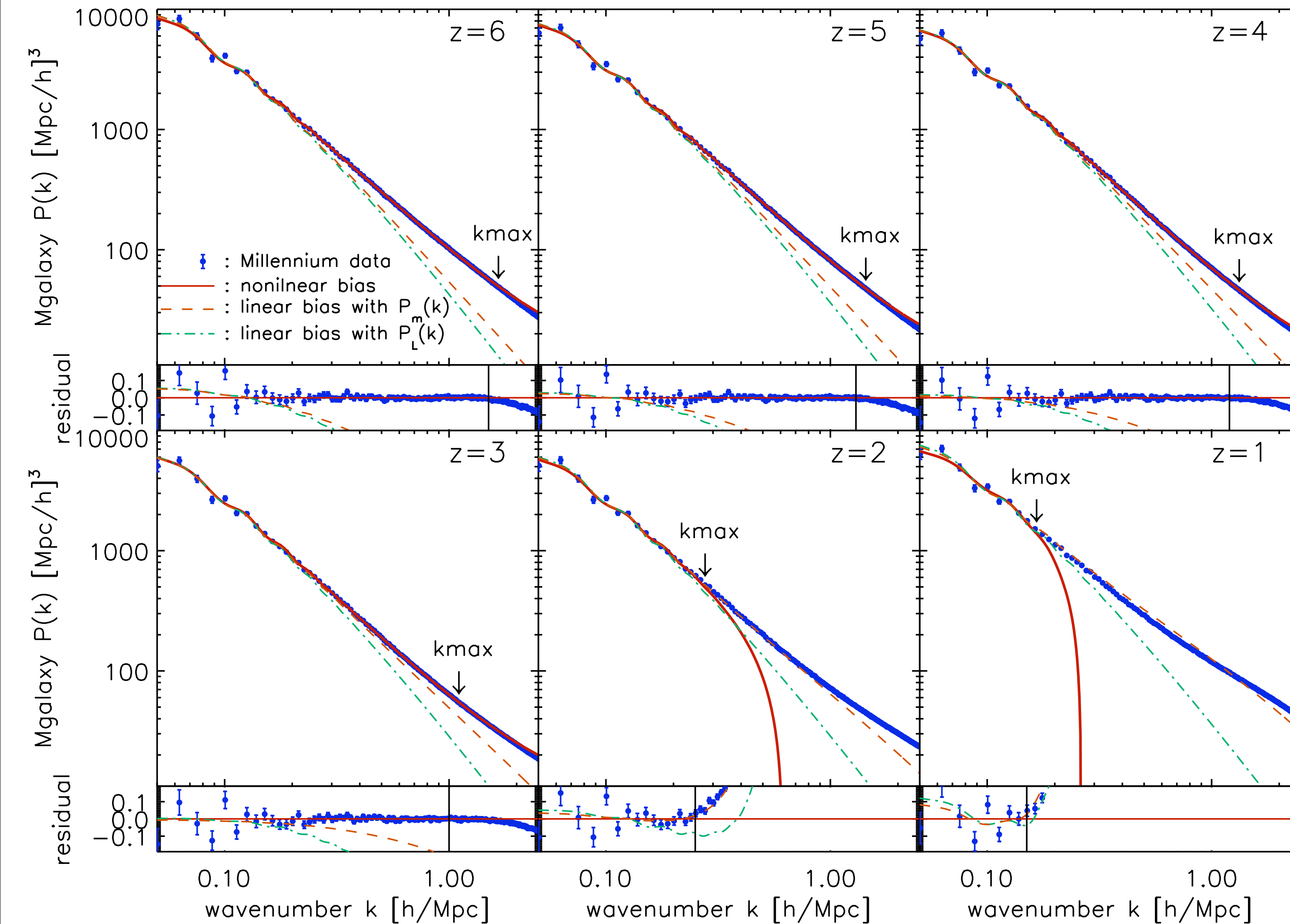
$$P_g(k) = N + b_1^2 \left[P(k) + \frac{b_2^2}{2} \int \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} P(q) \left[P(|k - q|) - P(q) \right] \right. \\ \left. + 2b_2 \int \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} P(q) P(|k - q|) F_2^{(s)}(q, k - q) \right]$$

- 3つのバイアスパラメータ b_1, b_2, N は、テイラー展開の係数 $c_1, c_2, c_3, \varepsilon$ と関係している。
- これらは銀河形成の情報を持っているが、我々の興味ではないため、 b_1, b_2, N は完全にフリー。

ミレニアム“銀河”シミュレーション

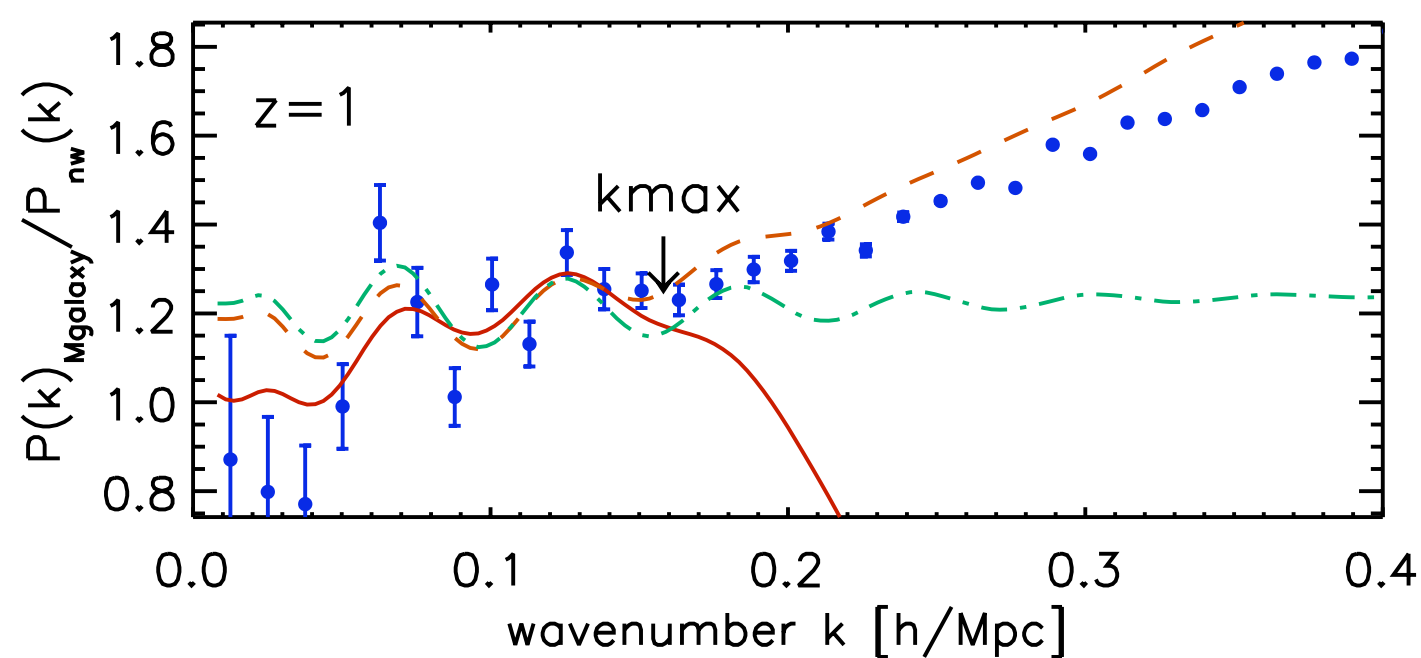
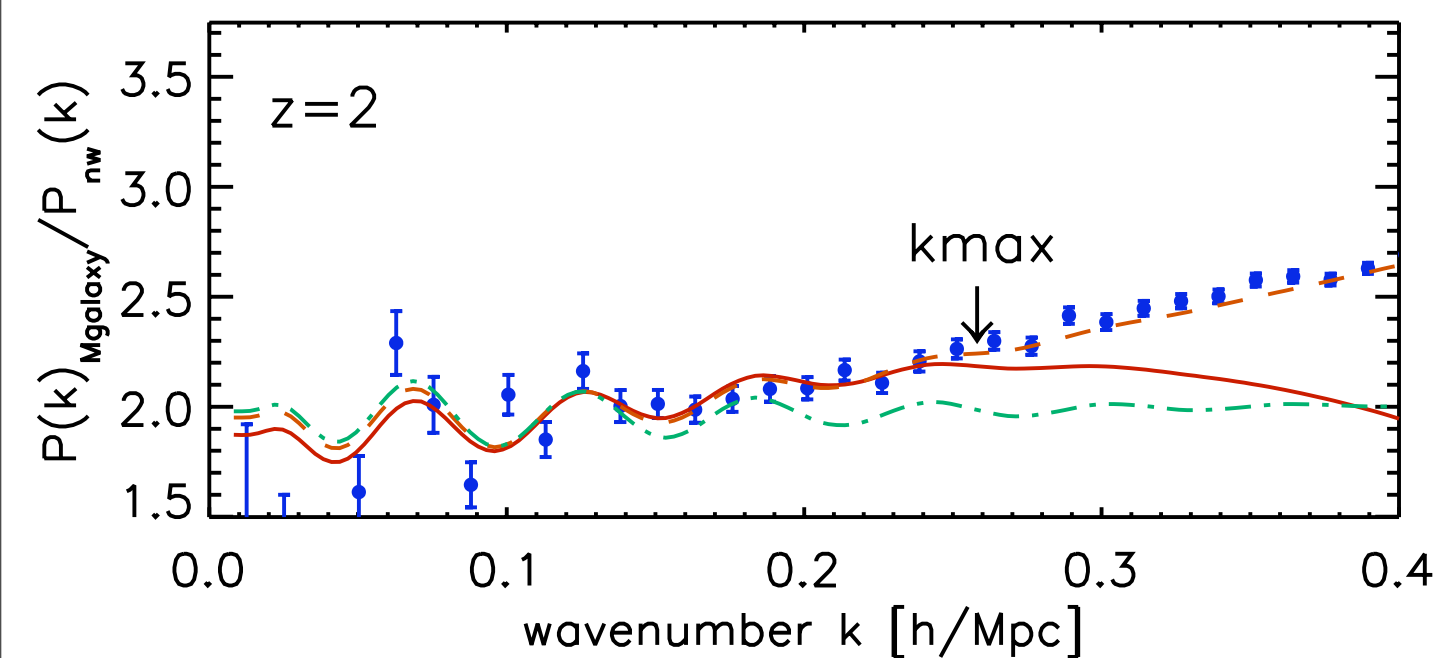
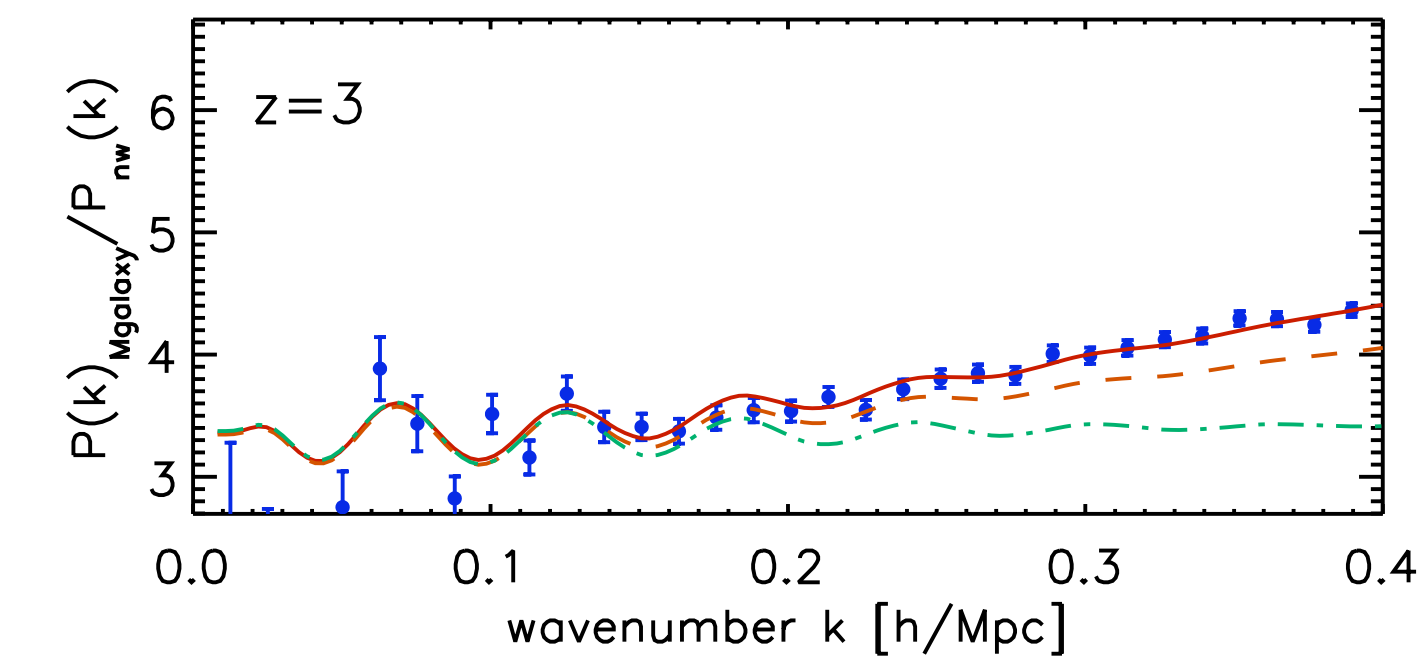
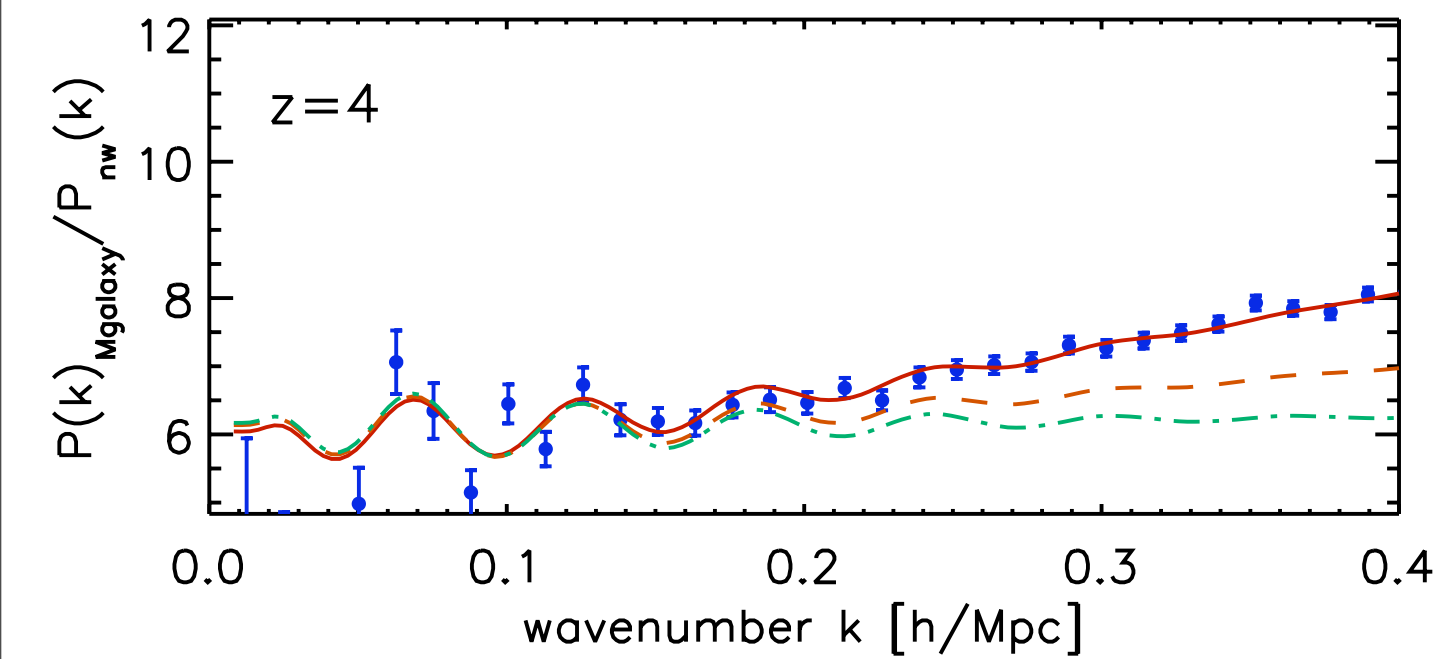
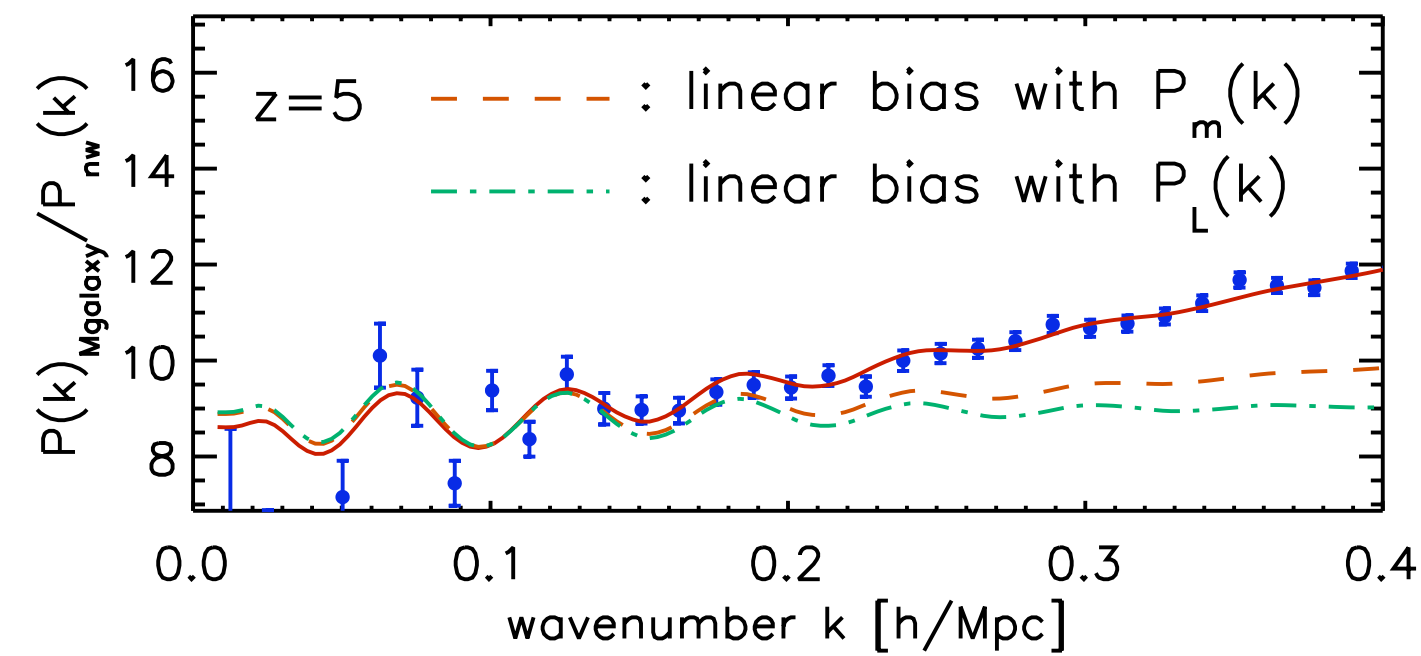
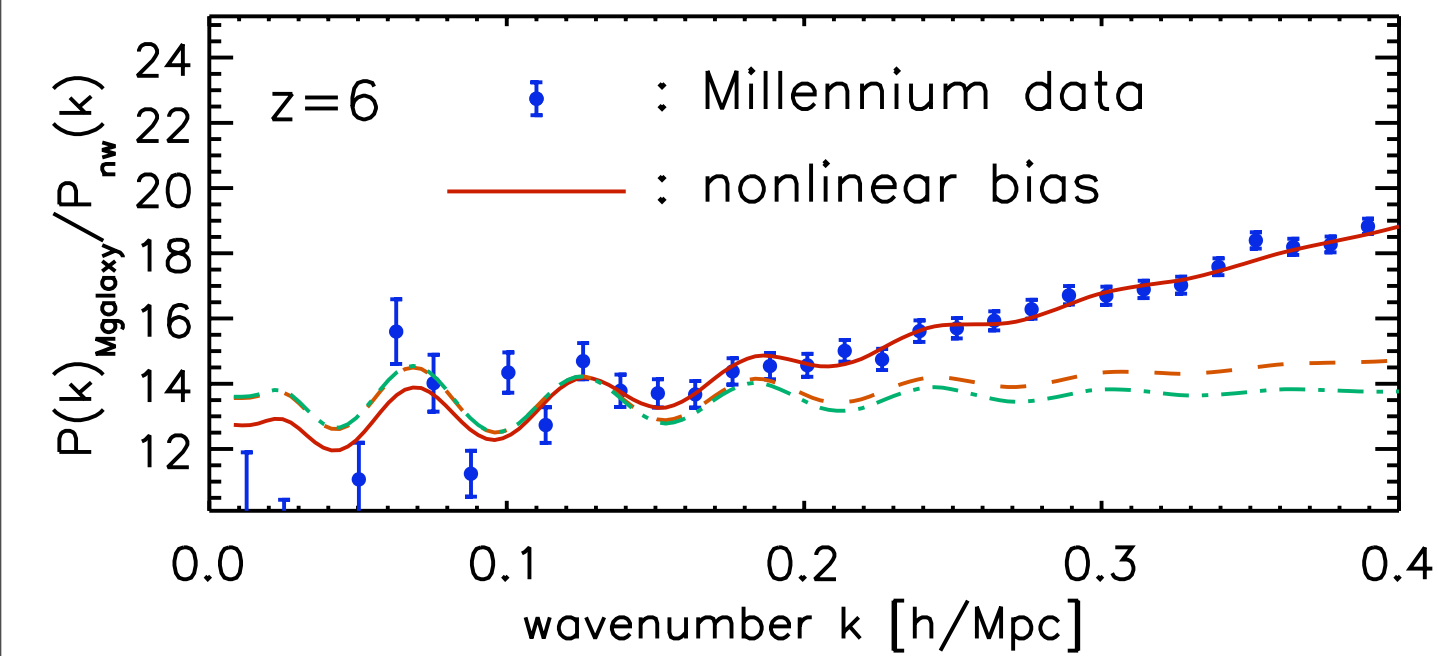
- 銀河の宇宙論的シミュレーションと比較してみる。
- 現状でベストなミレニアムシミュレーション (Springel et al. 2005) を使う。銀河は準解析的銀河形成コードにより作られたカタログを使う。
 - MPAコード: De Lucia & Blaizot (2007)
 - Durhamコード: Croton et al. (2006)

摂動論 vs MPA 銀河



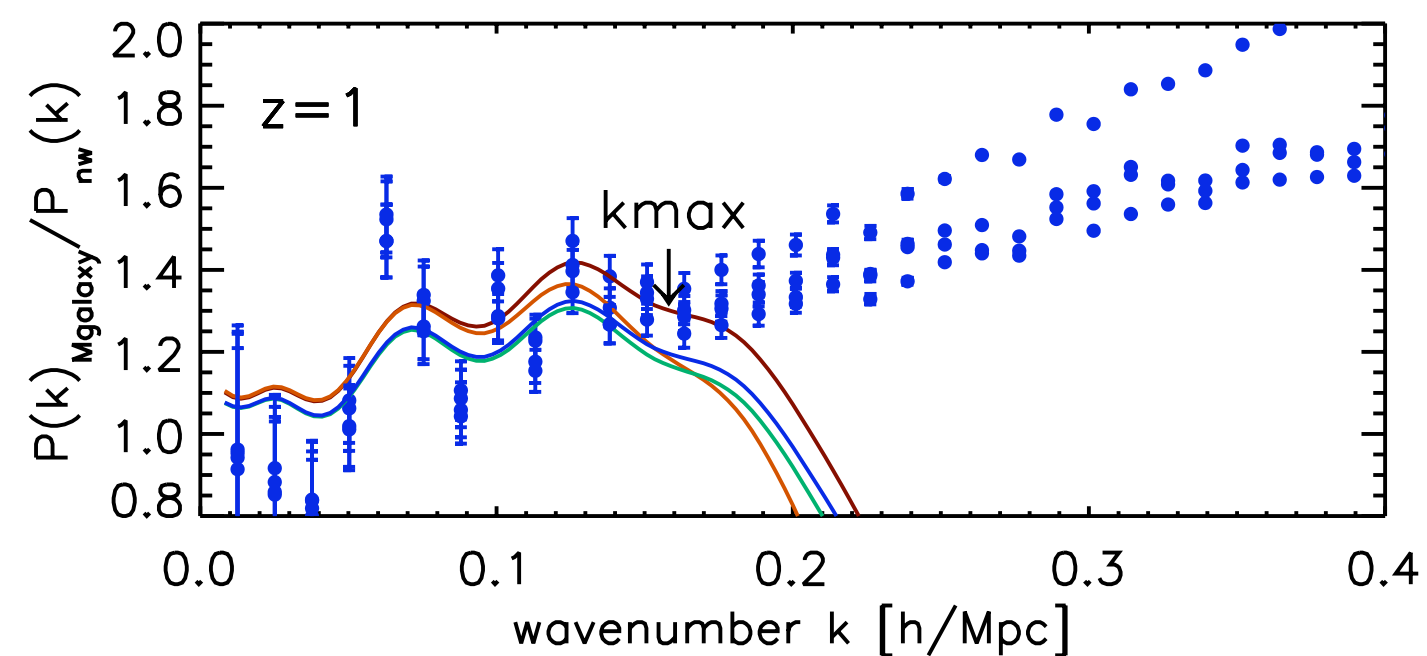
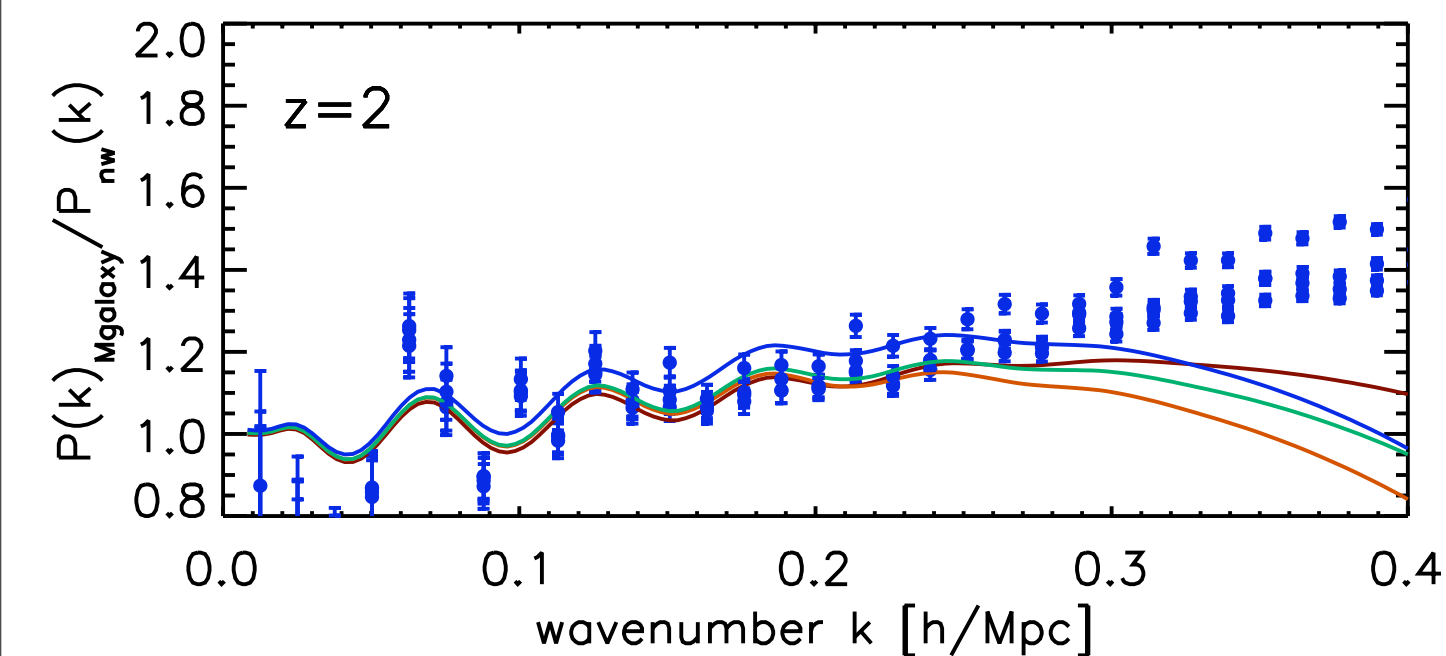
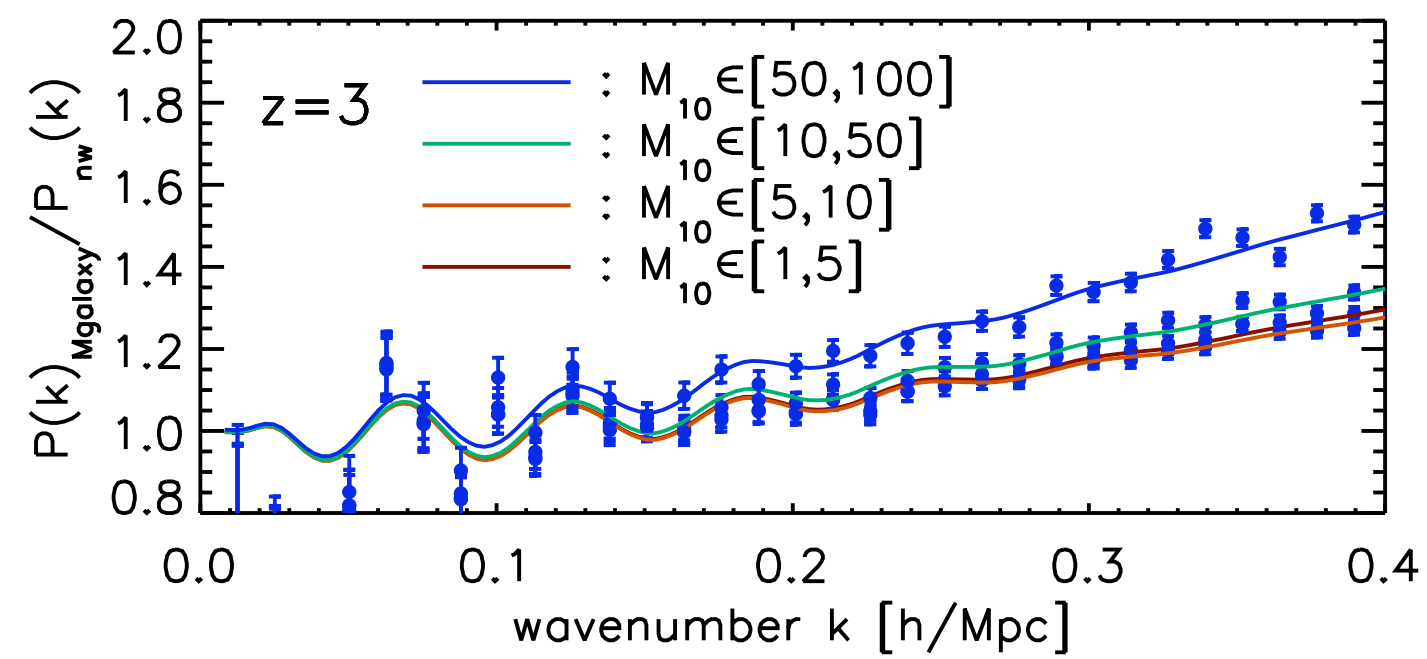
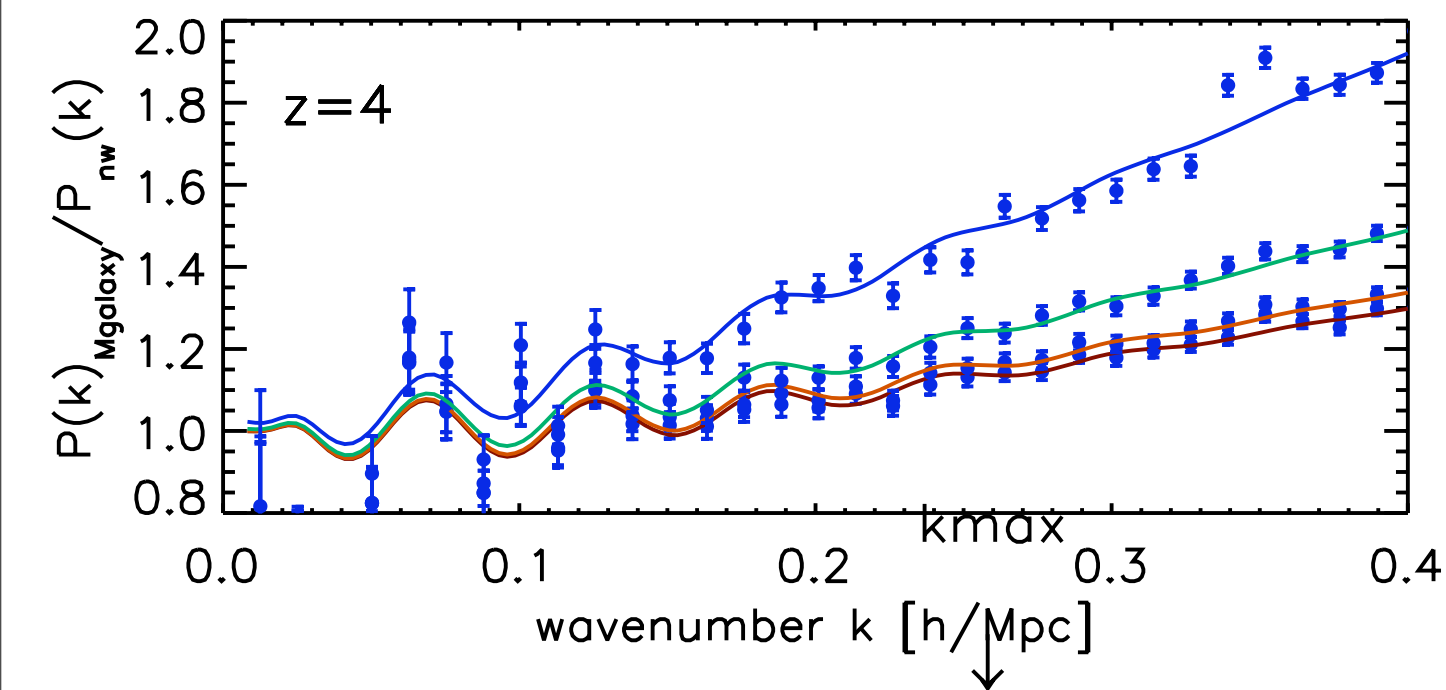
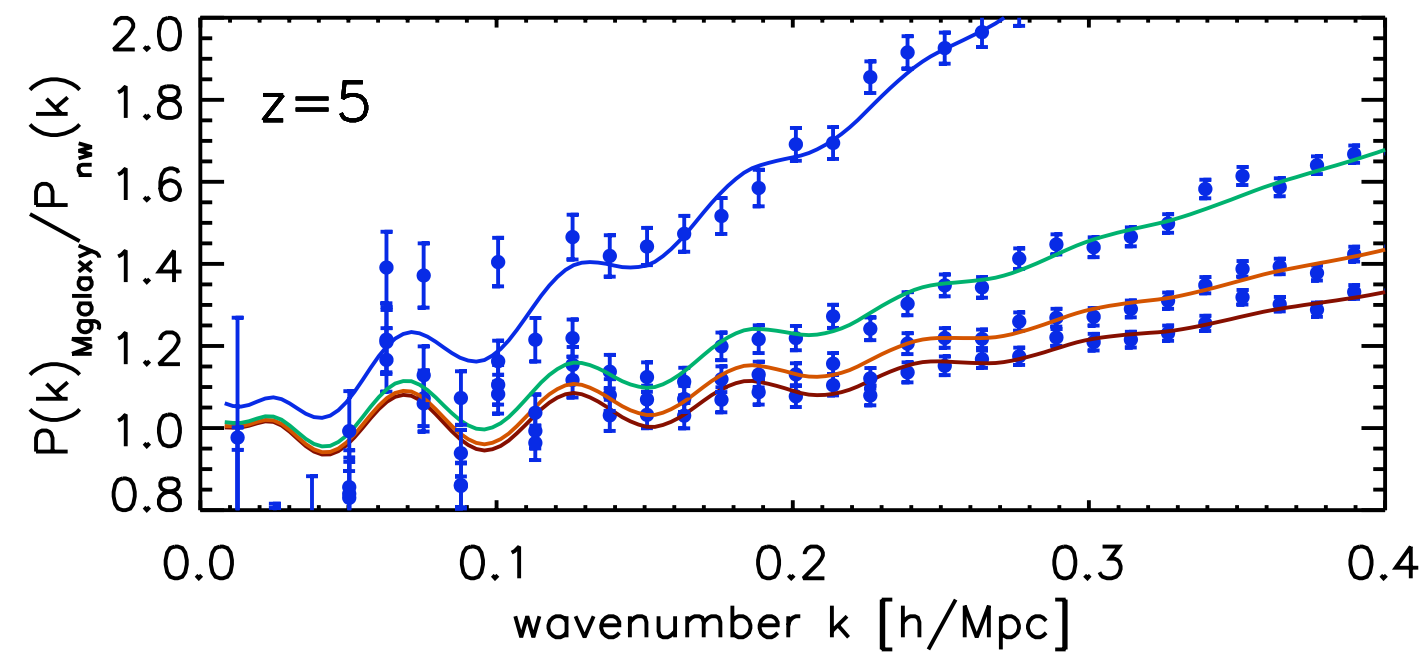
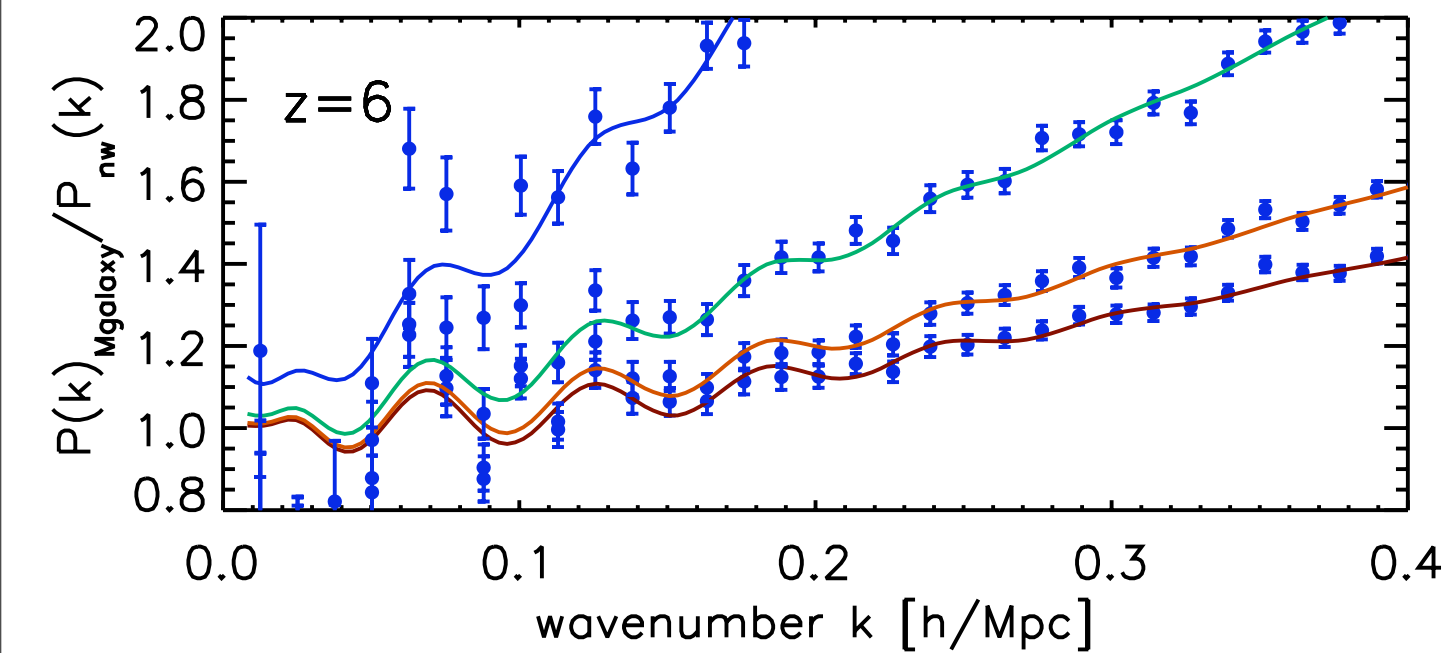
- k_{max} は摂動論で物質の $P(k)$ が記述できなくなる場所。
- バイアスのフィットも k_{max} で止める。
- 摂動論的非線形バイアスモデルは、良く合う！

BAO: 非線形バイアス



- BAOに非線形バイアスが重要なのは明白。
- ミレニアムの箱 $(500 \text{ Mpc})^3$ はあまり大きくないため、大スケールの $P_g(k)$ はノイズが大きい。

銀河の質量依存性

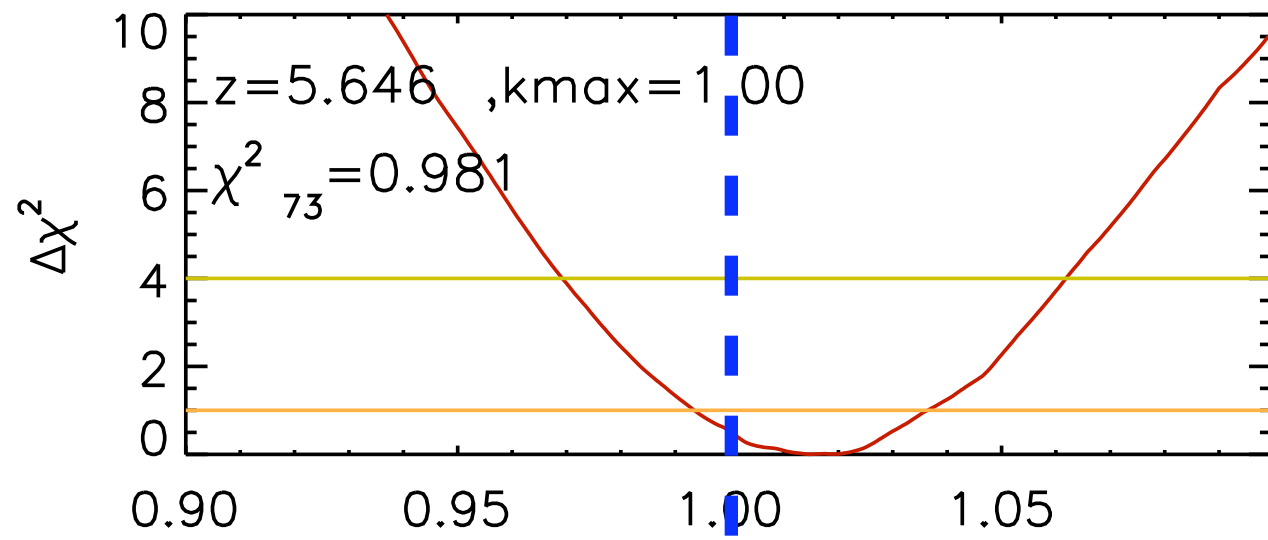


- 重い銀河ほど非線形バイアスが大きい。
- 摂動論はどの質量でも良く合っている。
- バイアスが大きくても摂動論は使える！

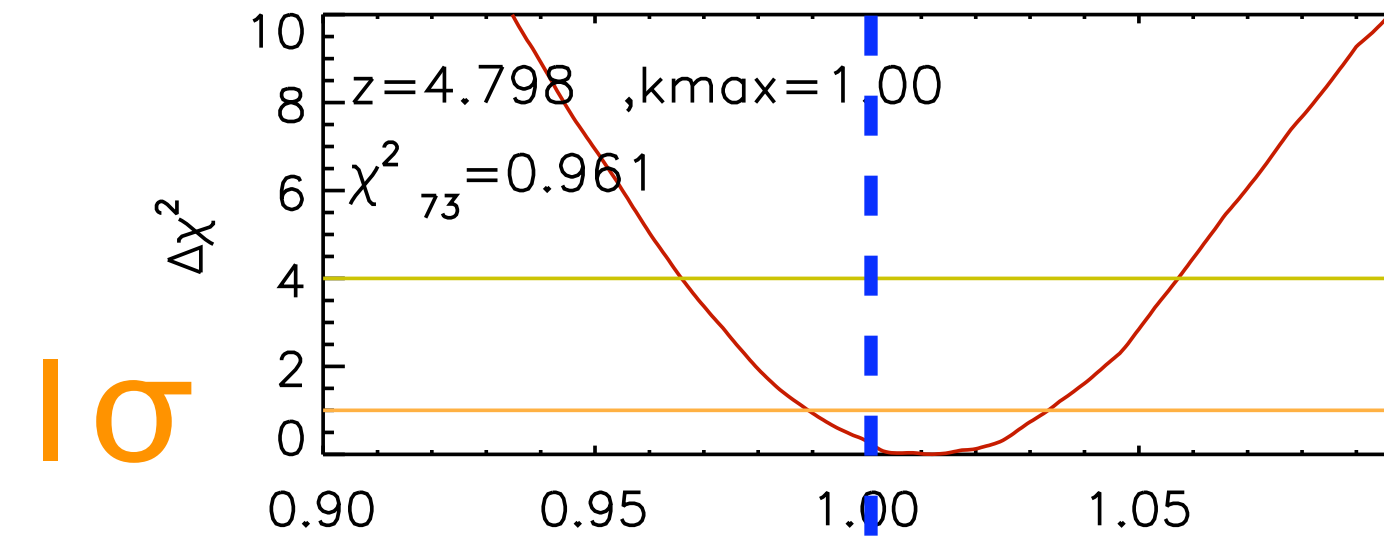
あまり感動しませんよね？

- こんな声が聞こえてきそうです: 「パラメータが3つもあるなら、何でもフィットできるわ！」
- “*With four parameters I can fit an elephant, and with five I can make him wiggle his trunk.*” - John von Neumann
- 真の問いは「**摂動論は、 $P_g(\mathbf{k})$ から正しい $D_A(\mathbf{z})$ と $H(\mathbf{z})$ を求められるか？**」の一点のみ。

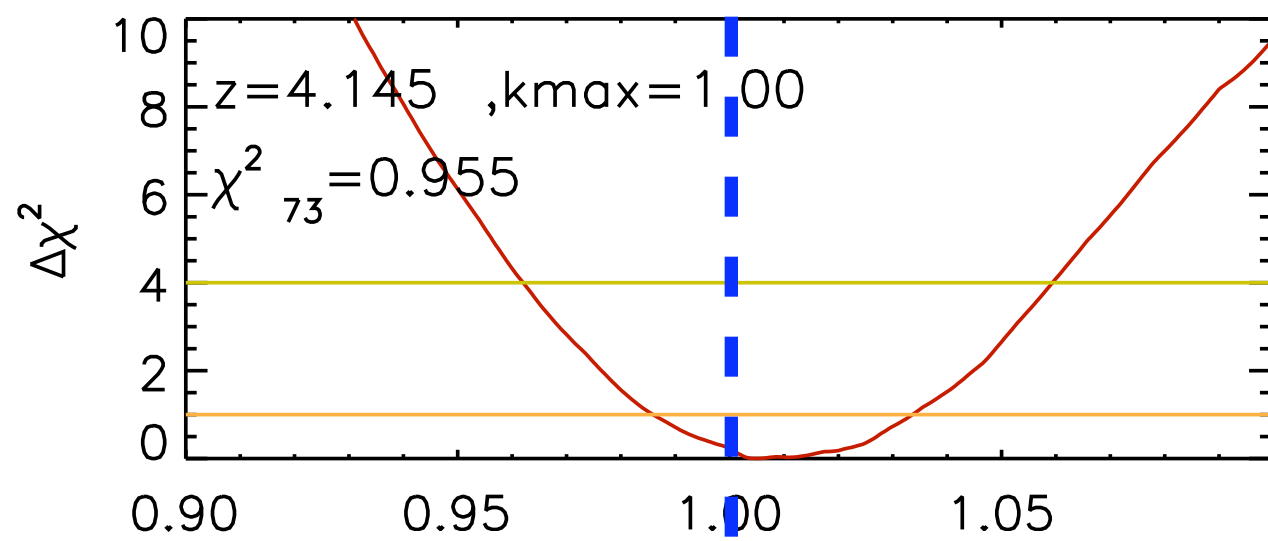
$D_A(z)$ を $P_g(k)$ から求める



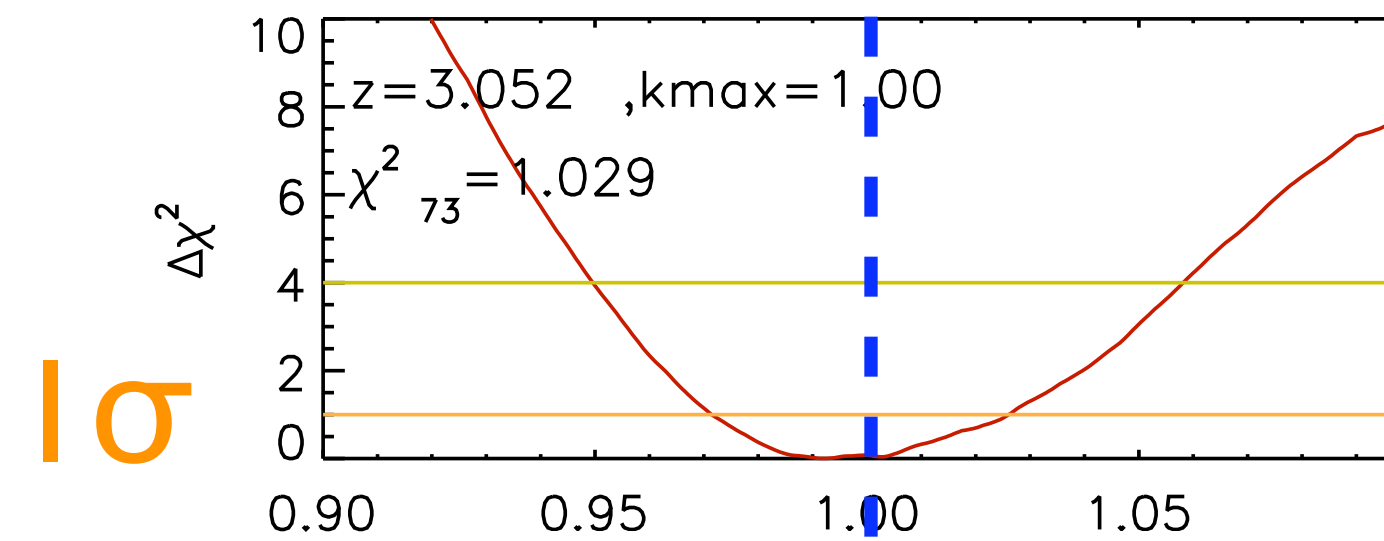
$D_A/D_A(\text{input})$



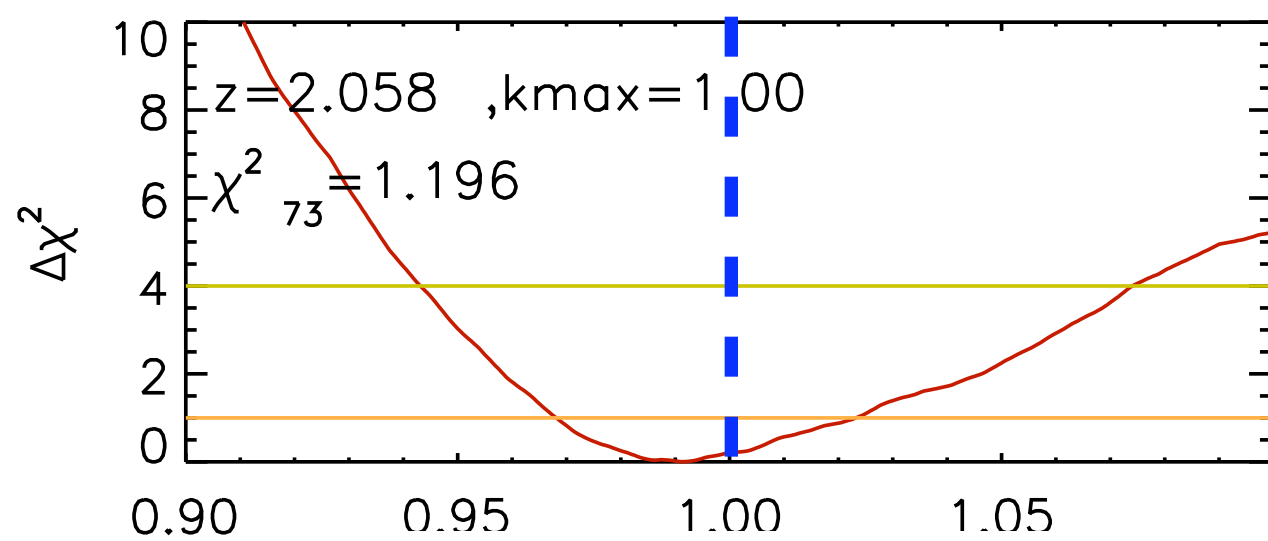
$D_A/D_A(\text{input})$



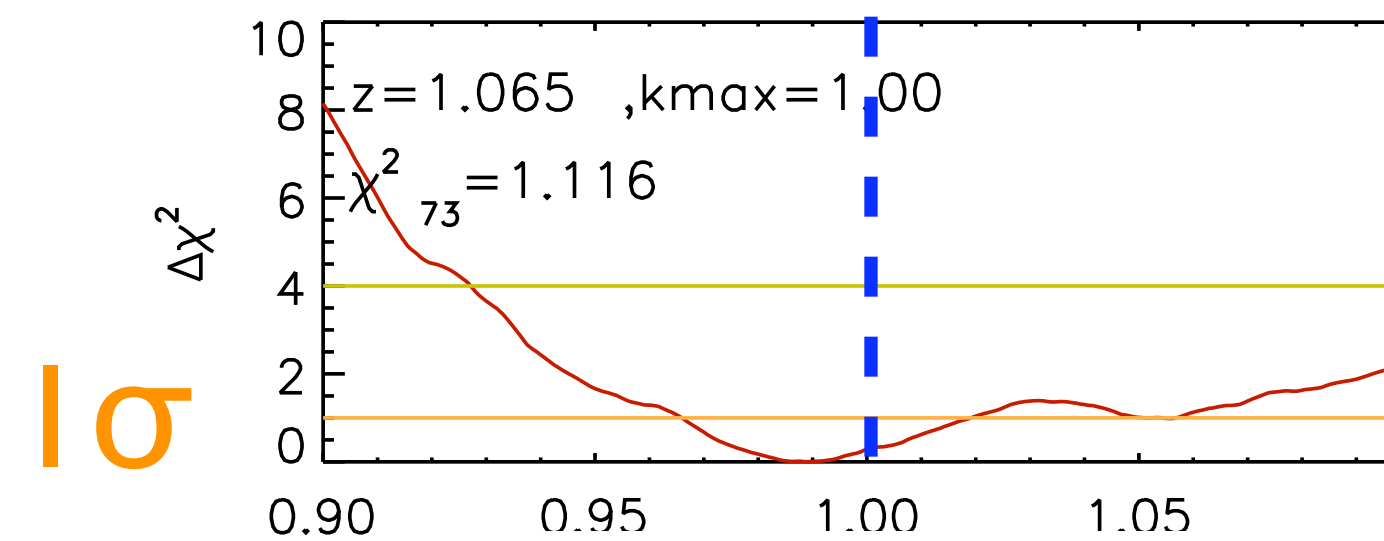
$D_A/D_A(\text{input})$



$D_A/D_A(\text{input})$



$D_A/D_A(\text{input})$



$D_A/D_A(\text{input})$

結果

3 次の摂動論を用いて、正しい $D_A(z)$ をミレニアム“銀河”シミュレーションから求める事に成功！

ただし $z=1$ は難しい・・・

現在の到達点

- $z > 2$ のBAOに対する非線形密度揺らぎの効果は、摂動論を用いて理解できた。
- 同じく、非線形バイアスの効果も摂動論を用いて理解できた。
- ミレニアムシミュレーションの $P_g(k)$ から摂動論を用い、正しい $D_A(z)$ を測定できた。

今後やるべき事

- $z=1$ の非線形効果の理解。
 - 最近研究が進んでいる新しい摂動論計算手法、「くりこみ摂動論」 Croce&Scoccimarro; Matarrese&Pietroni; Velageas; Taruya; Matsubara.
- より大きな箱を用いた銀河シミュレーション。
- 格段に正確な非線形バイアスの測定を行うため、3点相関関数（バイスペクトル）の摂動論計算。

3点相関関数

- 3点相関関数（バイスペクトル）を用いれば、 b_1 と b_2 を直接測定できる！

$$Q_g(k_1, k_2, k_3) = (1/b_1)[Q_m(k_1, k_2, k_3) + b_2]$$

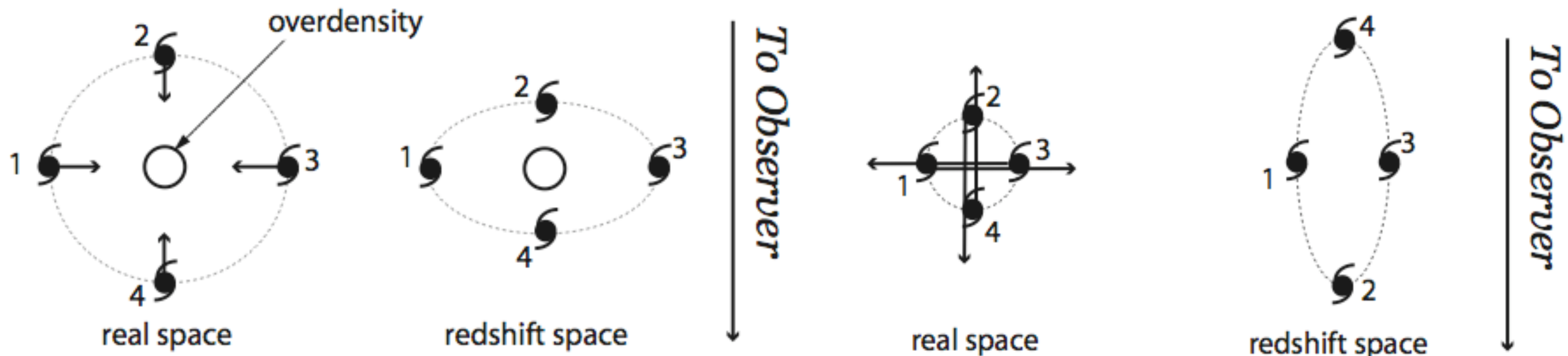
Q_m は物質のバイスペクトル。摂動論で計算する。

- この手法は2dFGRSの観測データに適用され、効果は実証済 (Verde et al. 2002): $z=0.17$ で $b_1=1.04\pm 0.11$; $b_2=-0.054\pm 0.08$
- 高赤方偏移のサーベイなら、10倍以上の精度の向上が期待できる。(Sefusatti & Komatsu 2007)
- 従って、バイスペクトルは非線形バイアスの補正に必要不可欠な道具と言える。

最も難しい問題

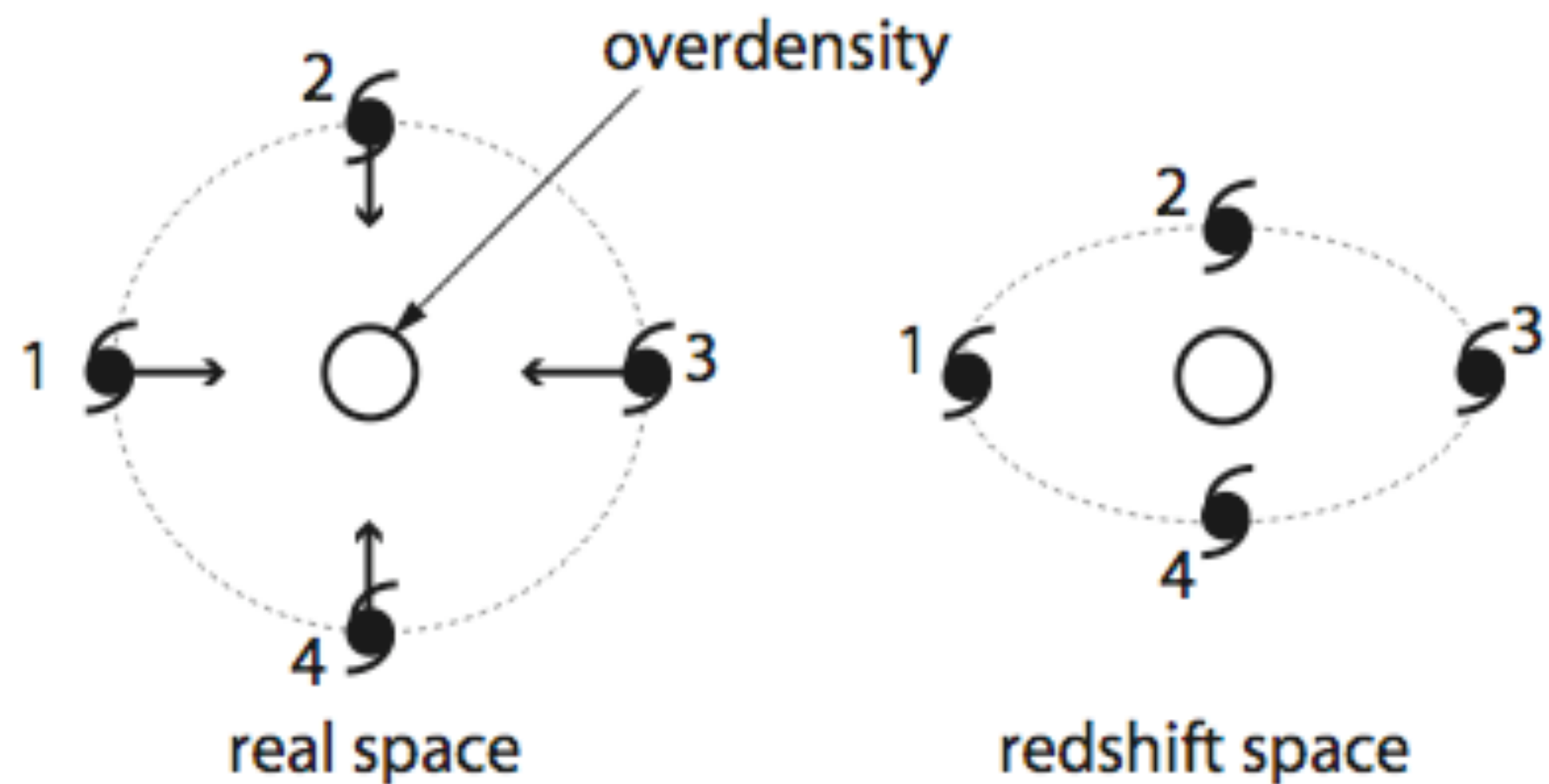
- あまり詳細に話す時間はないが、 $P_g(k)$ の理解の中で最も難しい問題は、銀河の固有速度に起因する「赤方偏移空間の歪み。」
- この効果の理解は $H(z)$ の測定にとって大変重要。
- なぜ難しいか？
 - 3次の摂動論計算が、 $z \sim 3$ でも破綻してしまう。

赤方偏移空間の歪み

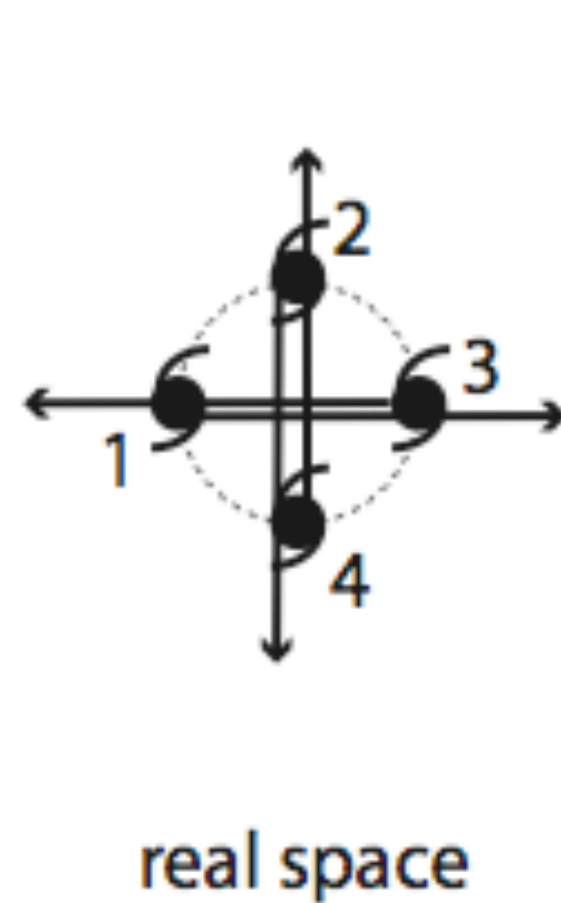


- (左) コヒーレントな速度場 => 視線方向の相関の上昇
– “Kaiser”効果
- (右) ビリアル的ランダム運動 => 視線方向の相関の減少
– “Finger-of-God”効果

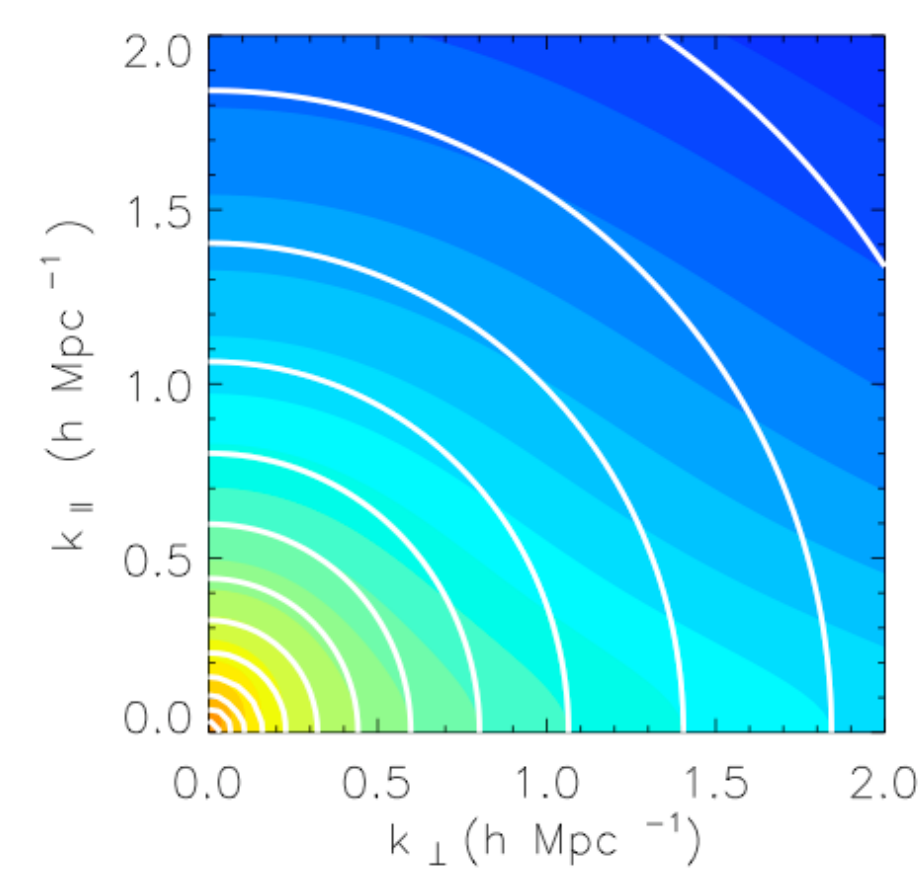
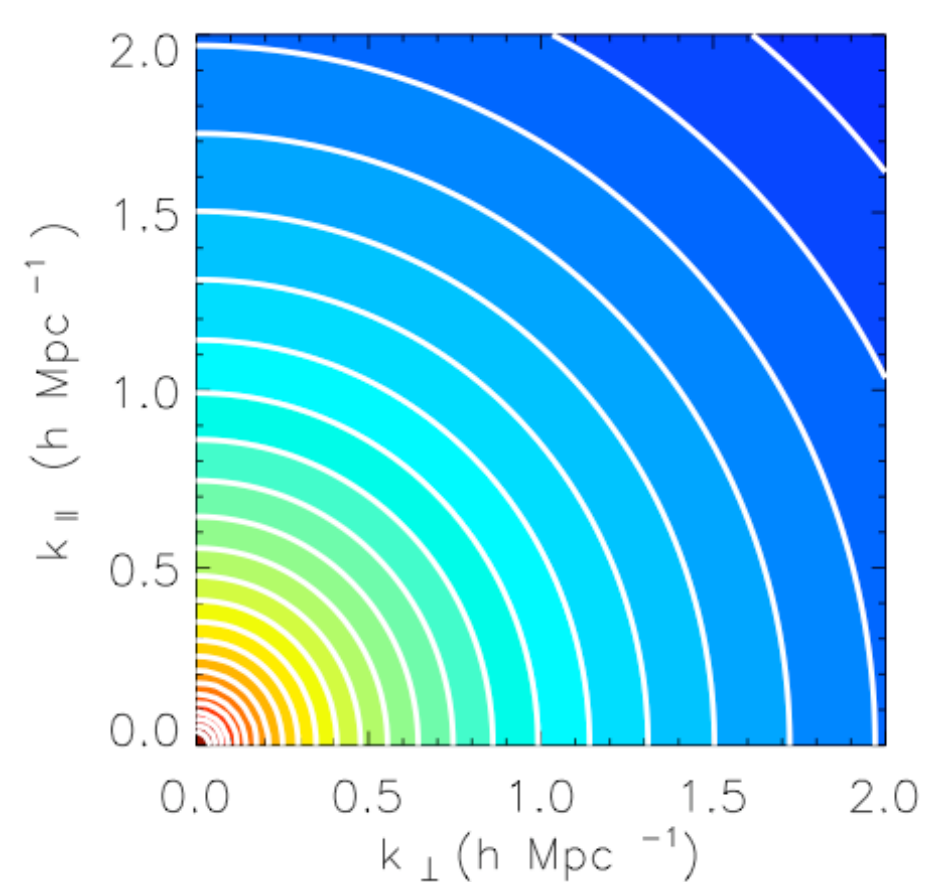
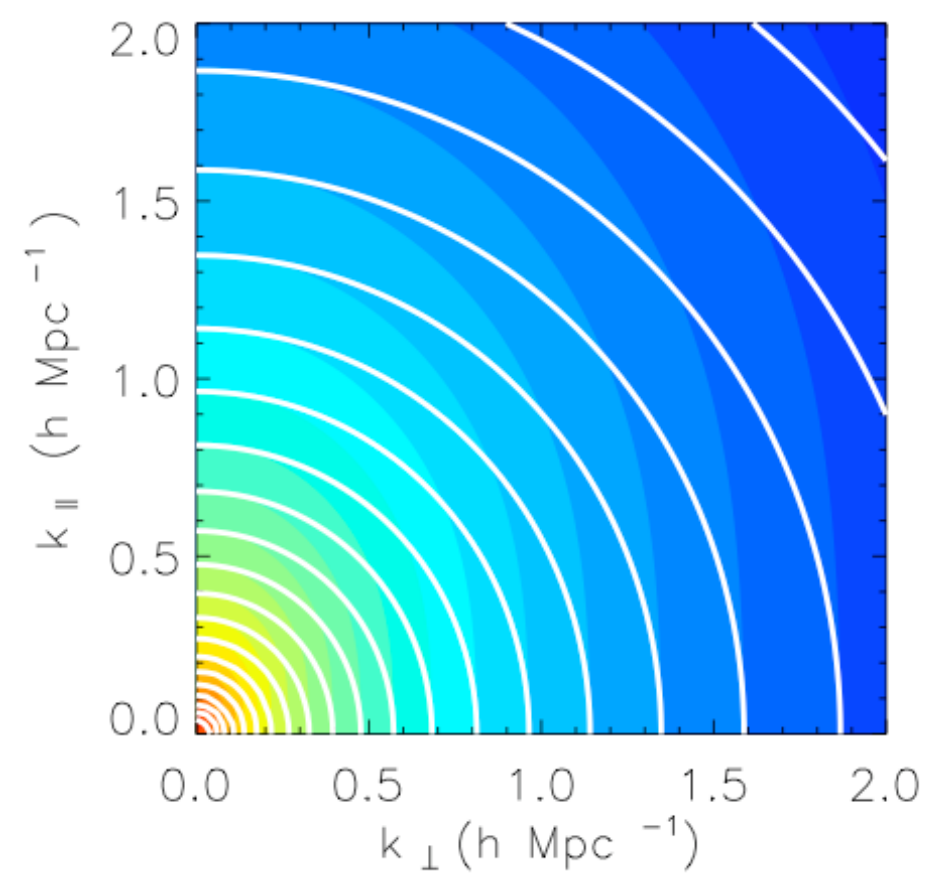
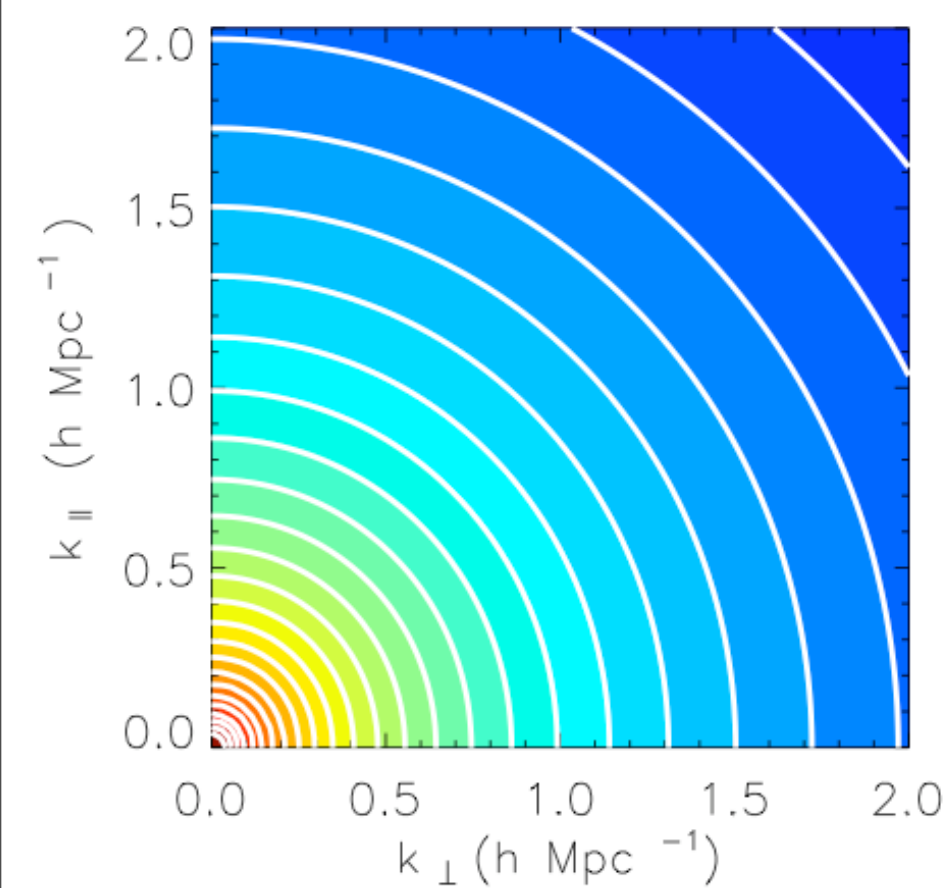
赤方偏移空間の歪み



To Observer

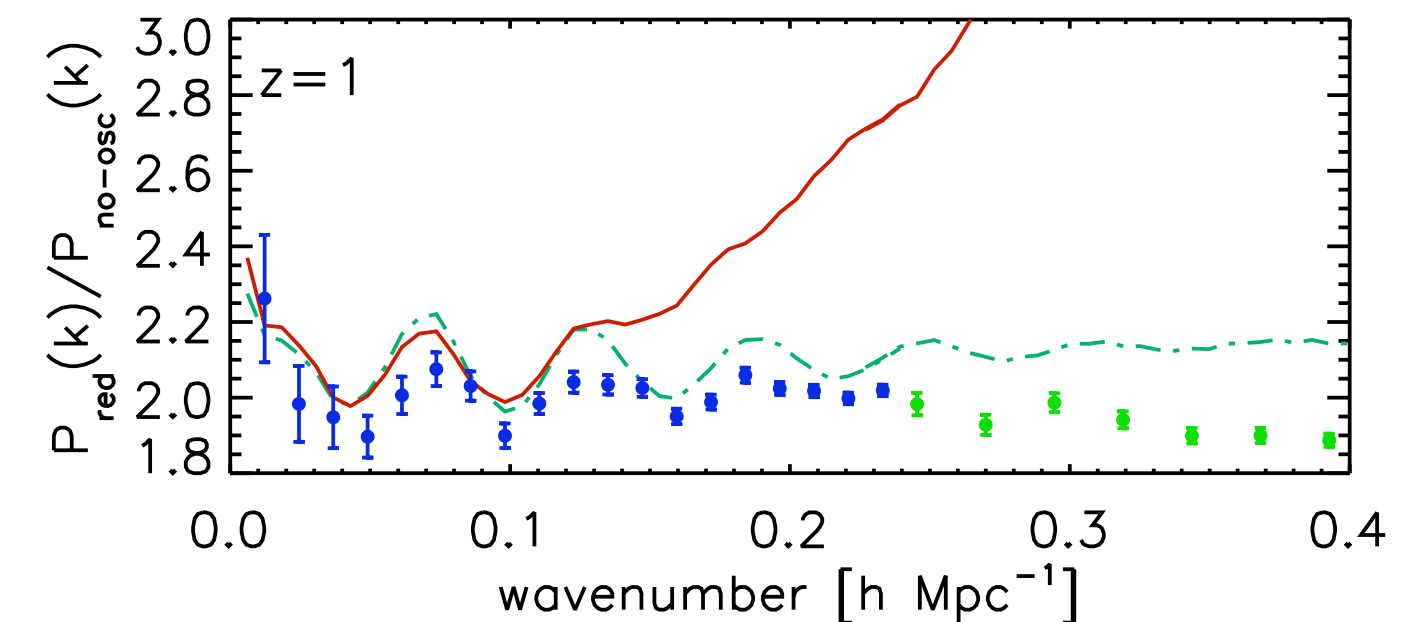
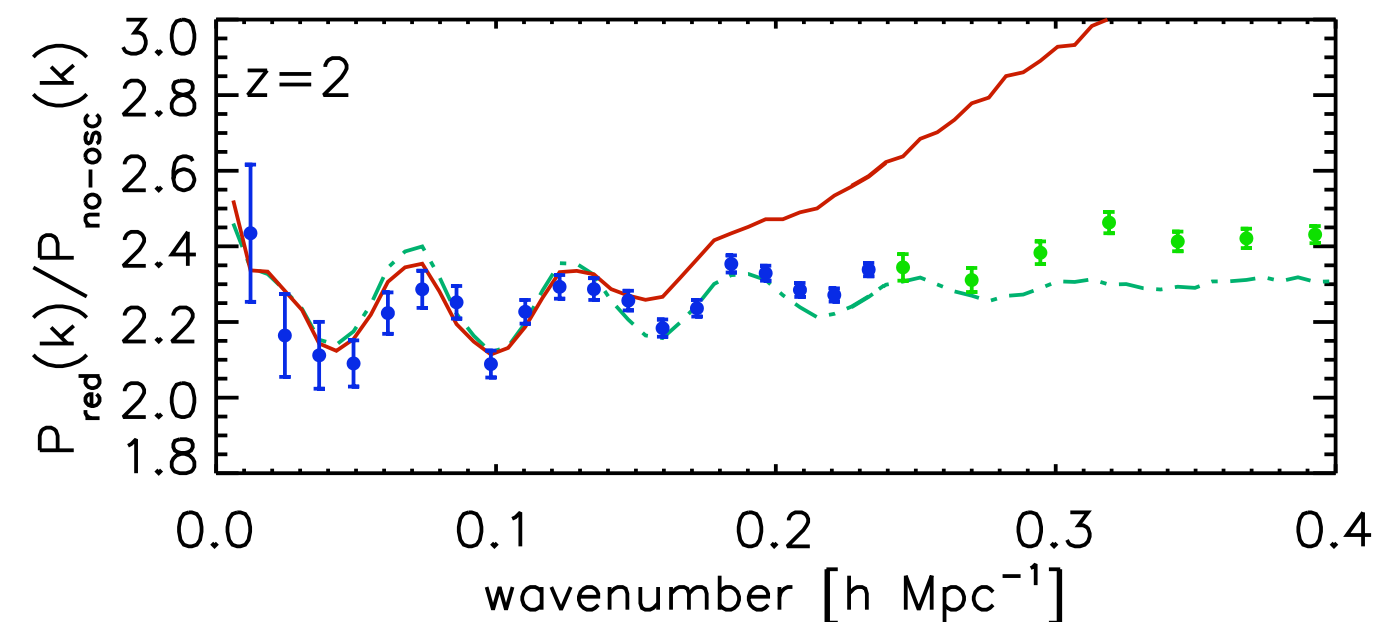
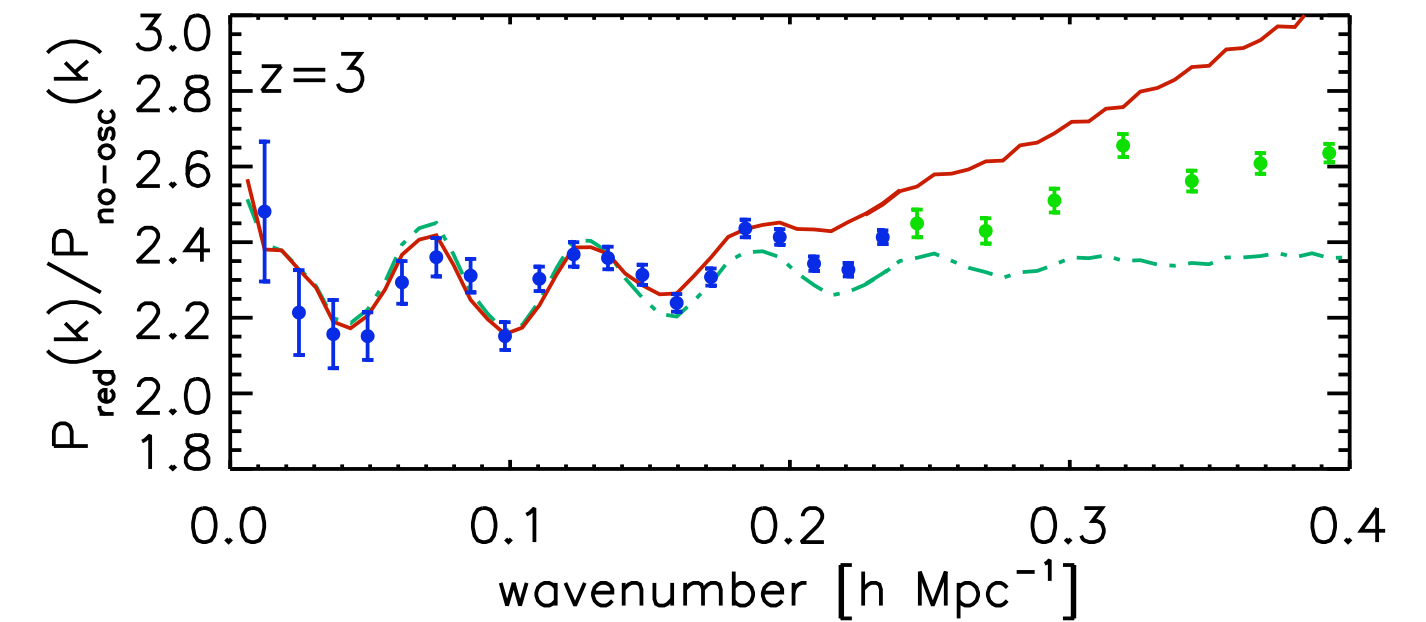
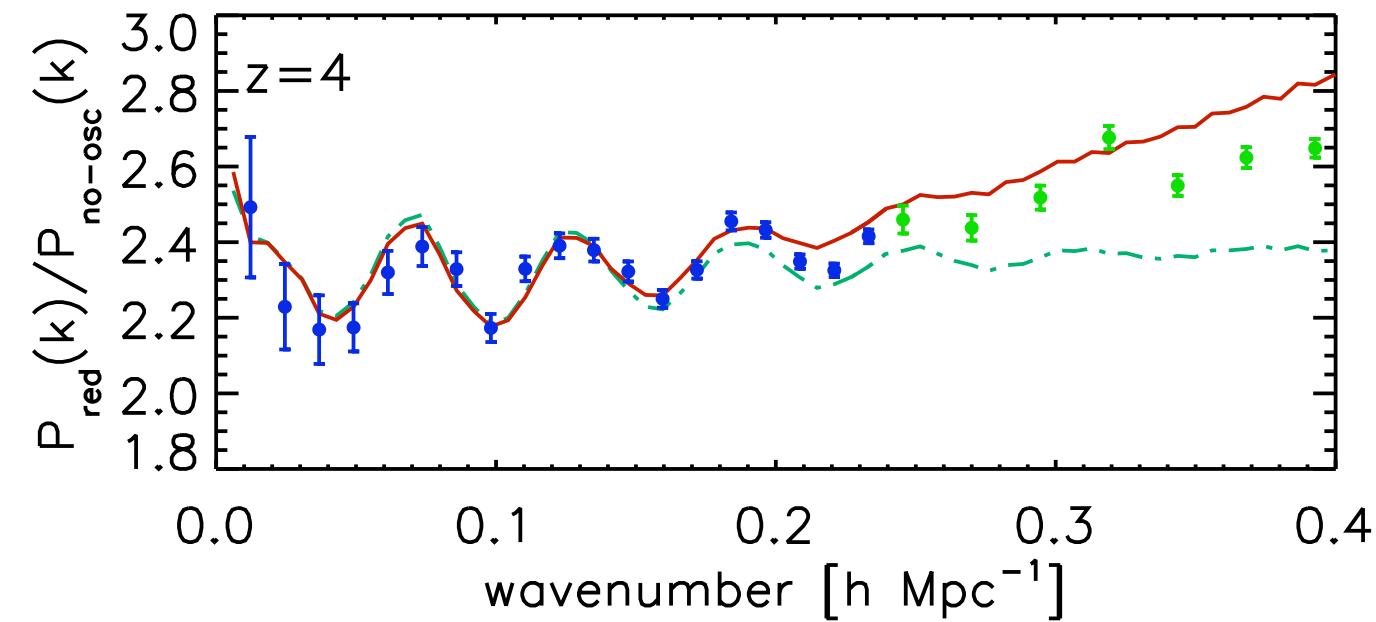
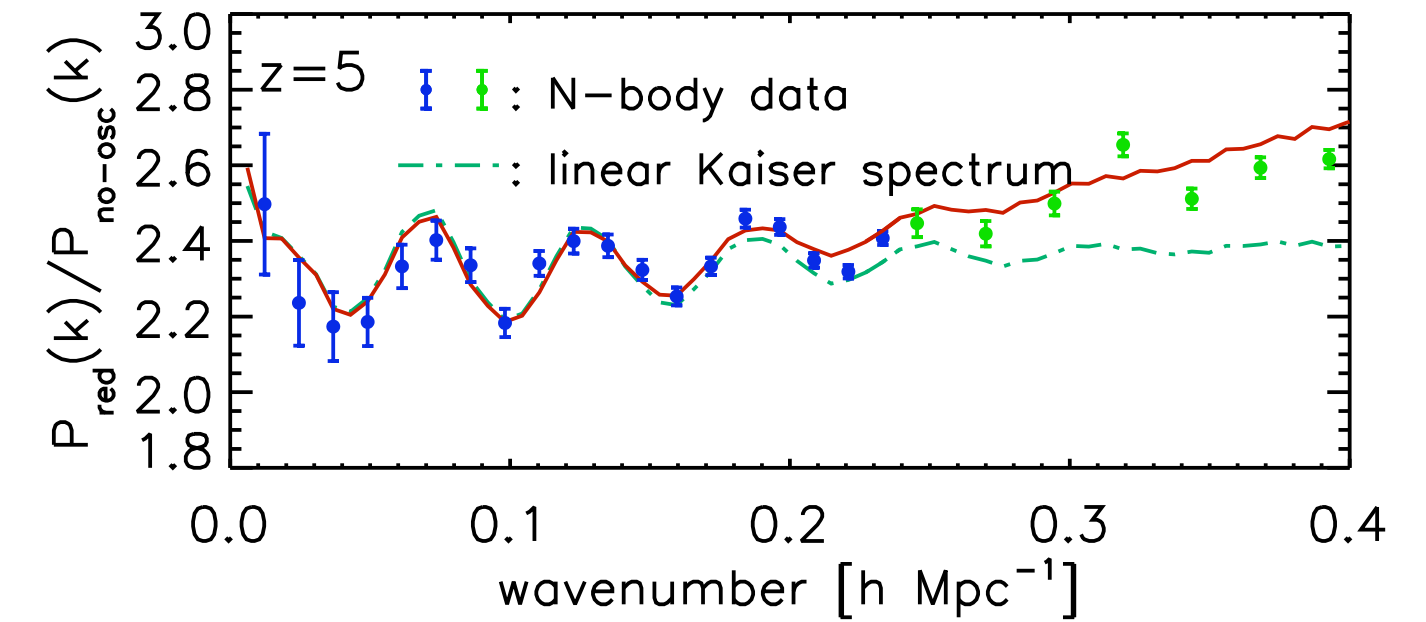
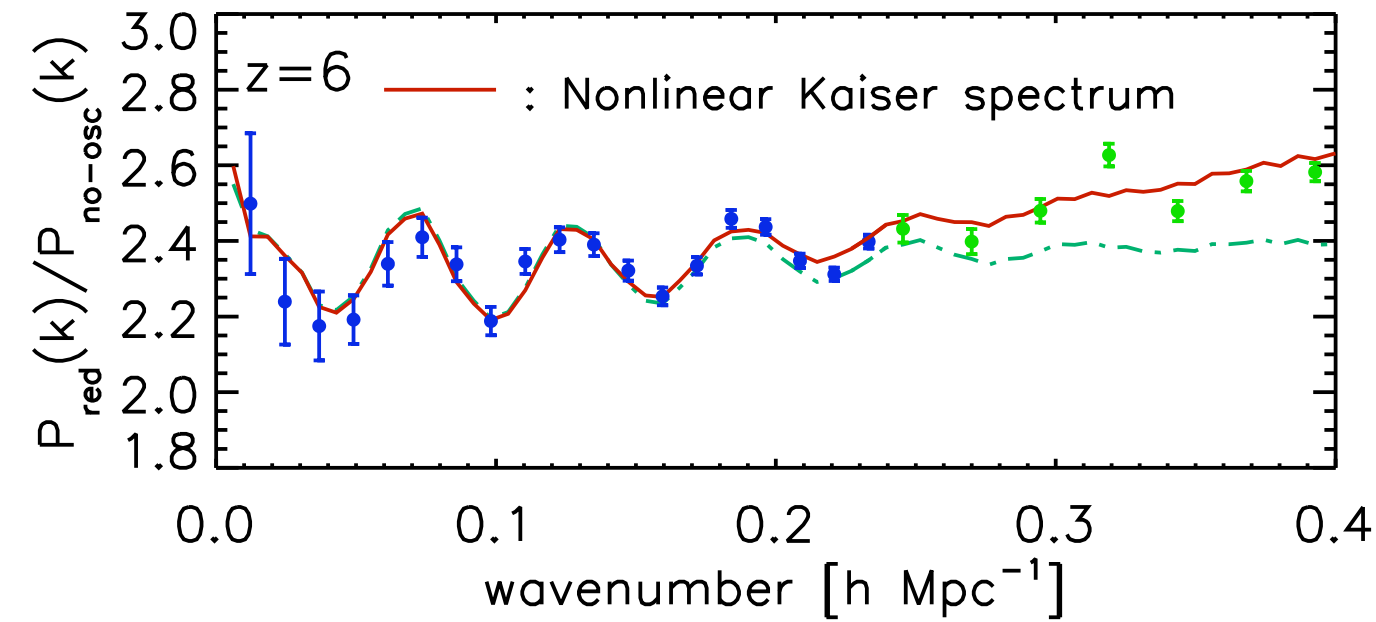


To Observer



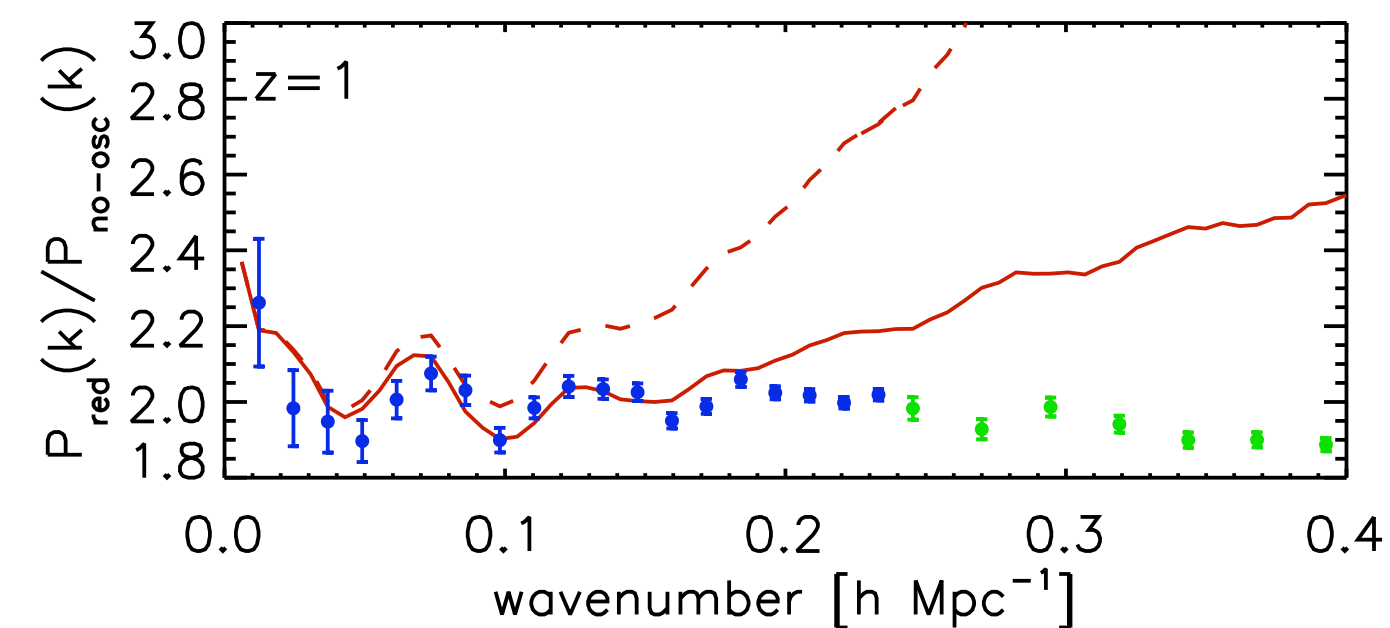
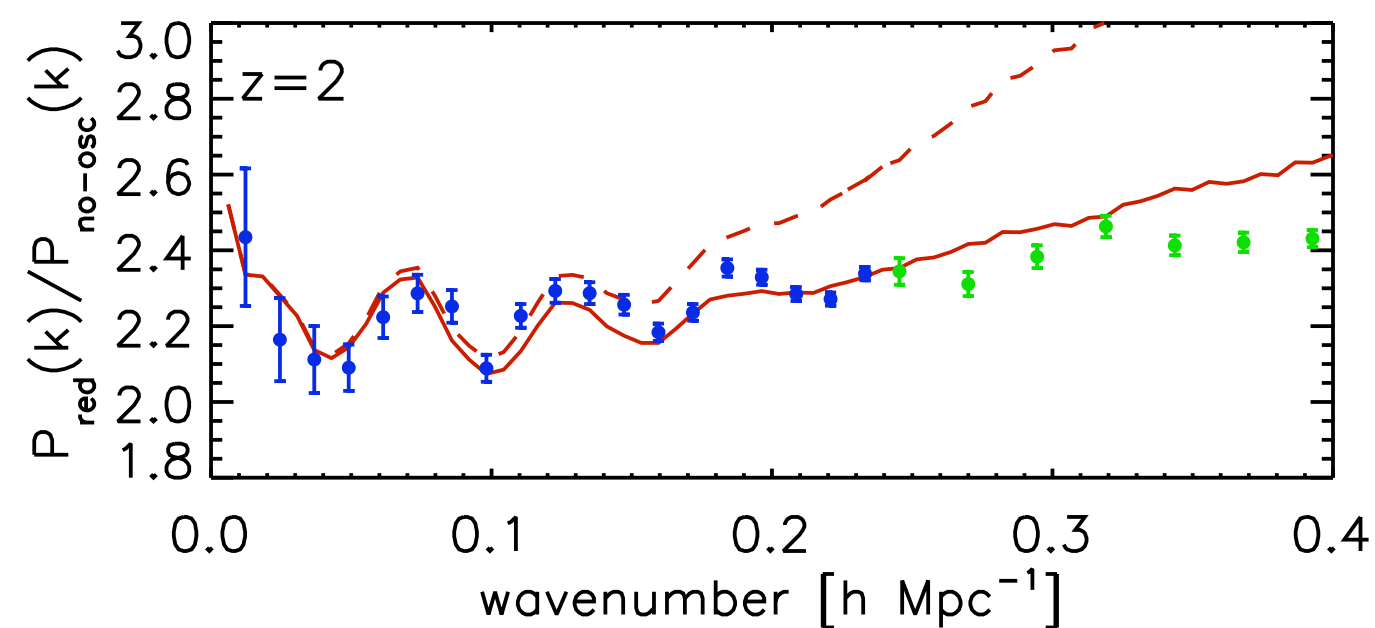
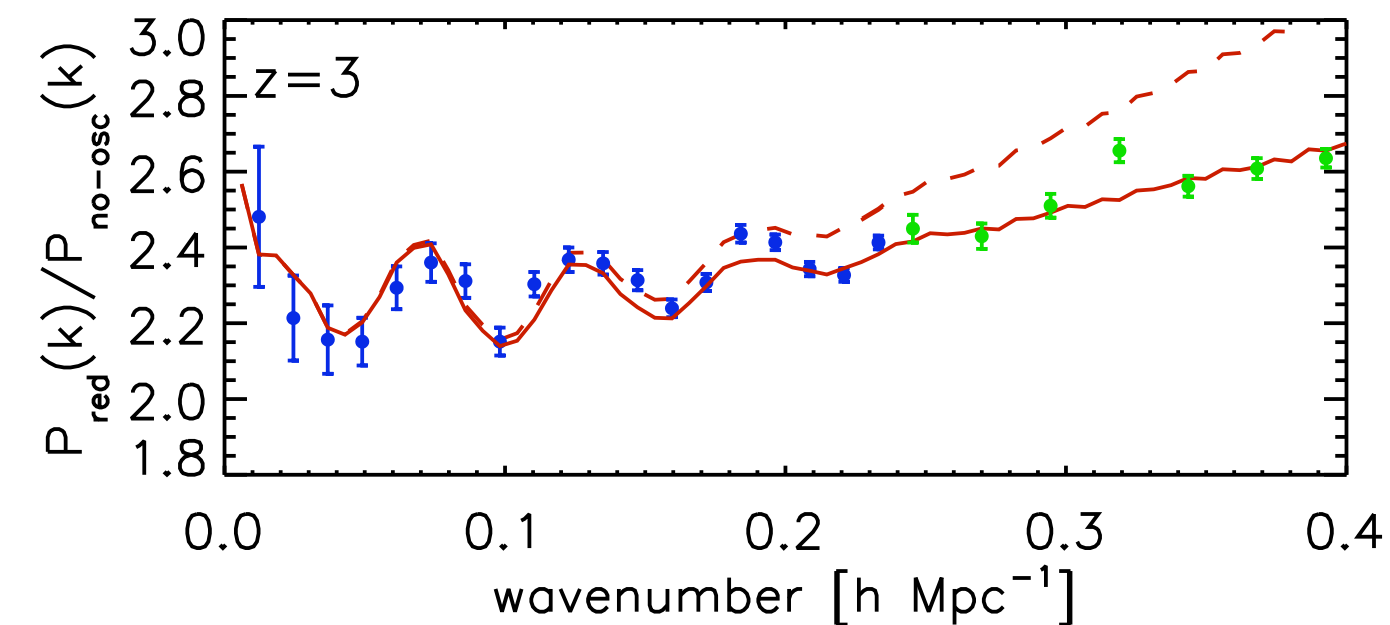
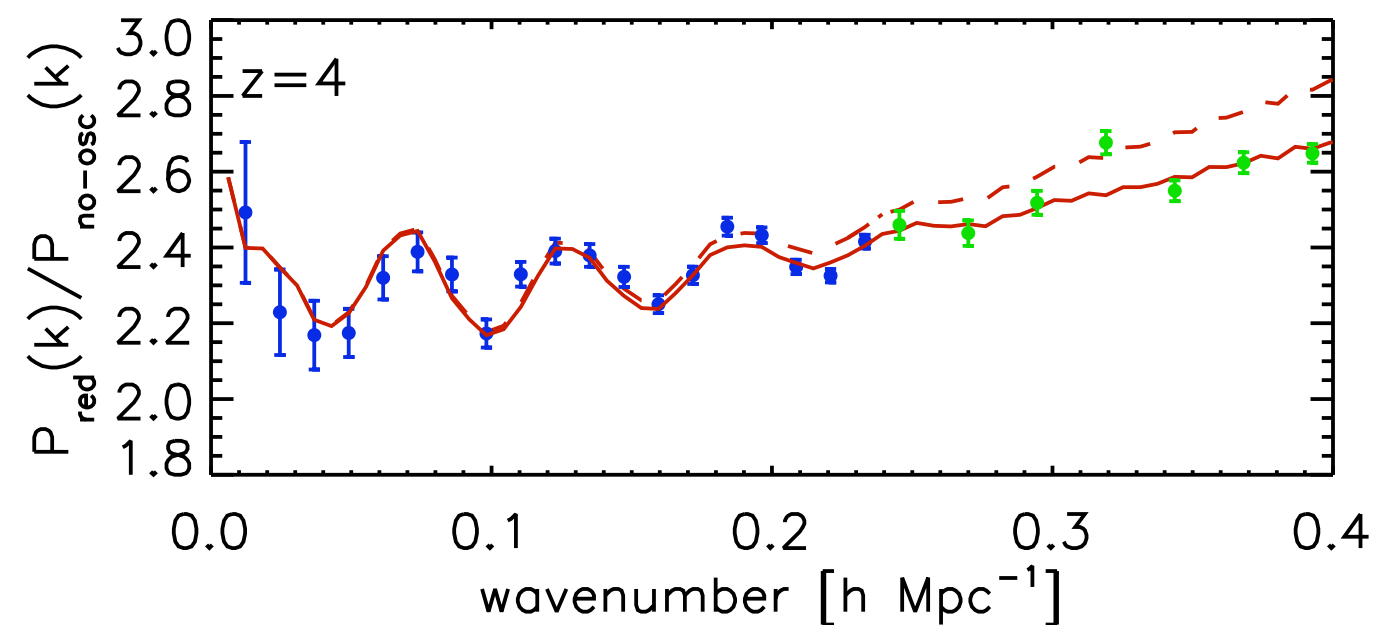
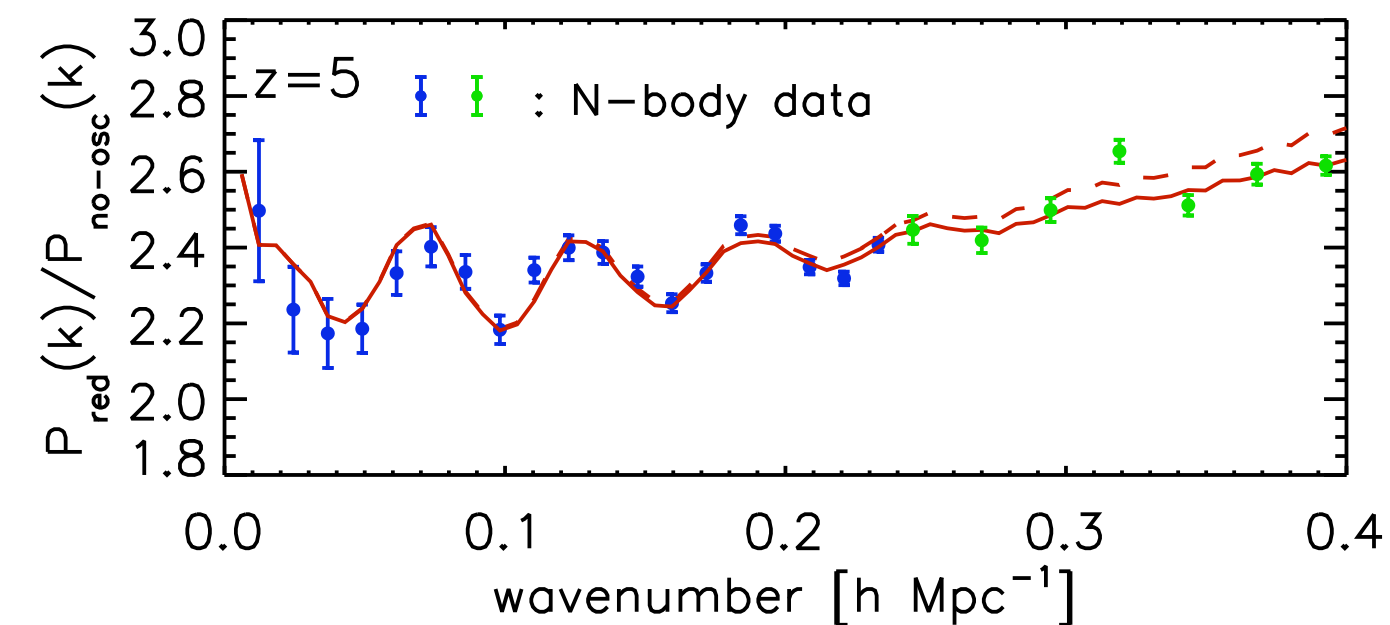
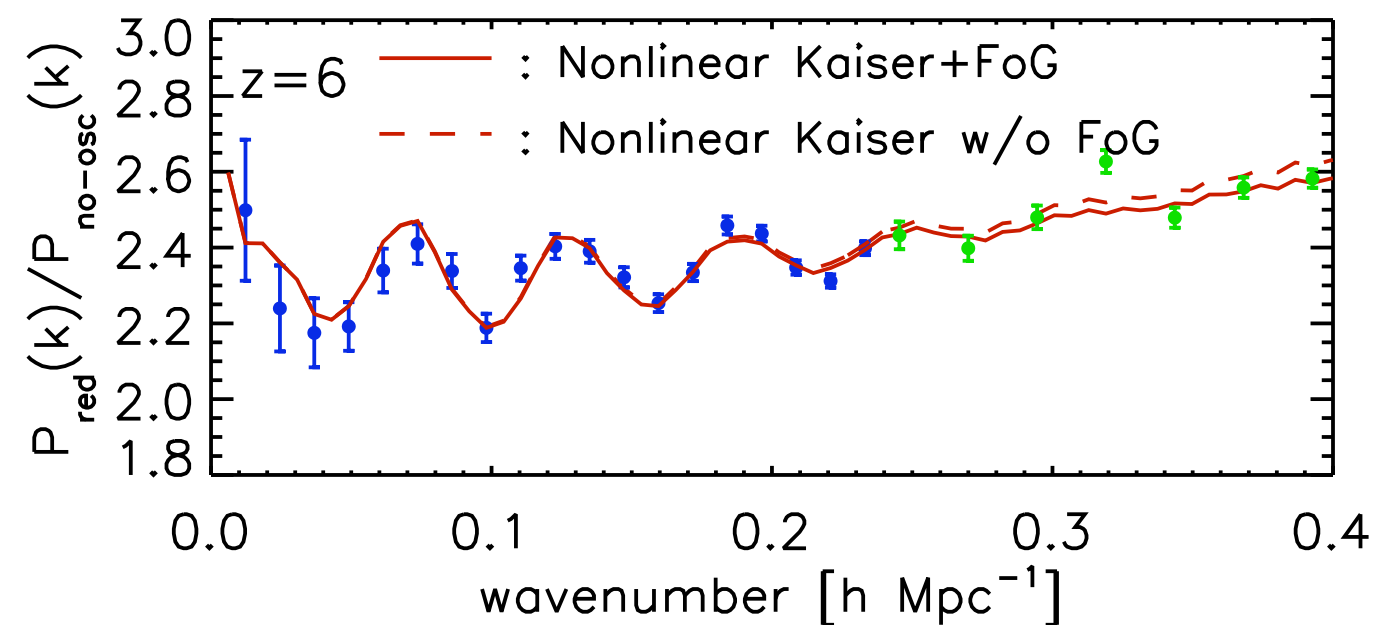
赤方偏移空間の摂動論

- 非線形なKaiser効果は摂動論で計算可能
- しかし、 $z=3$ で既にN体計算と合わない
- シミュレーションから得られる相関は、小さく抑えられている。=> Finger-of-God効果



赤方偏移空間の摂動論

- ここで、Finger-of-God効果を、フリーパラメータを導入する事で説明を試みる
 - $P_g(k)/(1+k_{\text{para}}^2\sigma^2)$
- そこそこ合っているが、できればパラメータは導入したくない。



観測計画 (地上)

- 地上観測でスペクトルを用いたサーベイ観測計画
[“**low-z**” = $z < 1$; “**mid-z**” = $1 < z < 2$; “**high-z**” = $z > 2$]
- Wiggle-Z (Australia): AAT/AAOmega, 観測中, **low-z**
- FastSound (Japan): Subaru/FMOS, 2008, **mid-z** ($H\alpha$)
- BOSS (USA): SDSS-III, 2009, **low-z** (LRG); **high-z** ($Ly\alpha F$)
- HETDEX (USA): HET/VIRUS, 2011, **high-z** ($Ly\alpha E$)
- WFMOS (Japan+?): >2011, **low-z** (OII); **high-z** (LBG)

観測計画（宇宙）

- 人工衛星でスペクトルを用いたサーベイ観測計画
 - SPACE (Europe): >2015, all-sky, $z \sim 1$ ($H\alpha$)
 - ADEPT (USA): >2017, all-sky, $z \sim 1$ ($H\alpha$)
 - CIP (USA): >2017, 140 deg², $3 < z < 6$ ($H\alpha$)
- これらはDark Energy Task Forceで“Stage IV”とランクされた観測計画に対応する。
 - Stage IVは、期待される暗黒エネルギーの制限が現在の制限よりも10倍以上良い、という条件

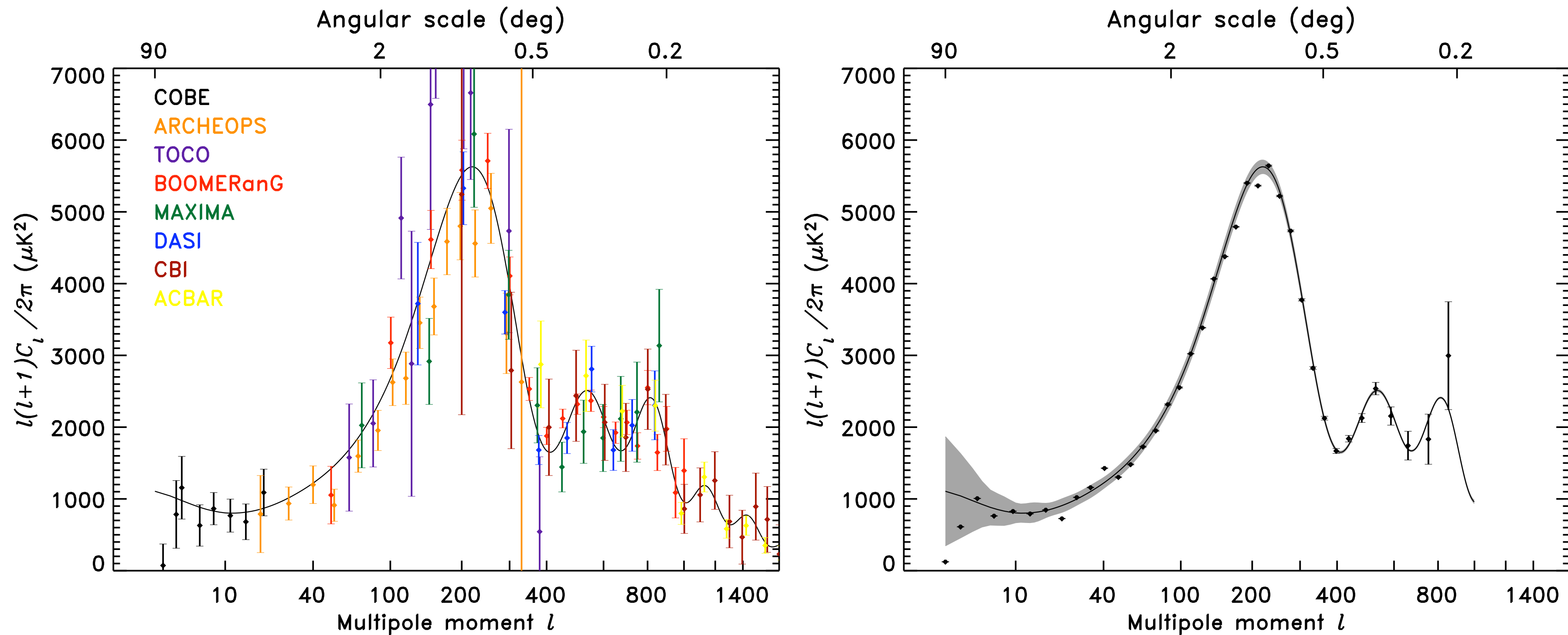
将来の展望

- 日本の宇宙論業界は、観測が完全に欠落している
- 観測・実験なくして真の進歩なし！
- BAO観測計画は、日本の宇宙論を強くできるか？
 - BAOは間違いなく宇宙論の王道
 - 科学的重要性も申し分なし
 - 激しい国際競争

将来の展望

- ゲームは単純：最初にStage IVをやった者が勝つ。
- 確かに地上観測計画はたくさんある。しかし、
 - 我々はWMAPから何を学んだか？
- 地上に留まらねばならない理由はない。

WMAP: 使用前と使用後



- BAO地上観測の寄せ集めは、左の図のようにはならず。一つの衛星観測の力は絶大。

国産BAO衛星計画？

- アメリカ (>2017)
 - JDEM公募は2008年の春
 - SNAP (超新星+重力レンズ) vs ADEPT (BAO) vs CIP (BAO) vs ...
- ヨーロッパ (>2015)
 - DUNE (超新星+重力レンズ) vs SPACE (BAO) vs ...
- アメリカやヨーロッパは国内の競争が激しく、互いに殺しあっているようなもの。漁夫の利？

まとめ (1 / 3)

- **現在の到達点**

- BAOが $D_A(z)$ や $H(z)$ の測定に使える事は、2dFGRSやSDSSのデータで実証済み
- 非線形性の理解に対する、摂動論的手法の有効性が示された

まとめ (2 / 3)

- 今後やるべきこと
 - $z \sim 1$ での非線形性の理解
 - $z < 2$ のサーベイにとって重要
 - 摂動論を用いた3点相関関数の計算
 - 正確な銀河バイアスの決定に重要
 - 赤方偏移空間の歪みの理解
 - $H(z)$ の測定に重要

まとめ (3 / 3)

- **将来の展望**

- たくさんの地上BAO観測が計画されている。
- なぜ地上に留まる？宇宙に行けないか？
- 日本の宇宙論業界は挑戦できるか？
- 日本の宇宙論業界は挑戦**したい**のか？