

超長波長密度揺らぎとハッブル パラメータの変更の等価性

東京大学大学院理学系研究科/Kavli IPMU

寺澤 凌 (M1)

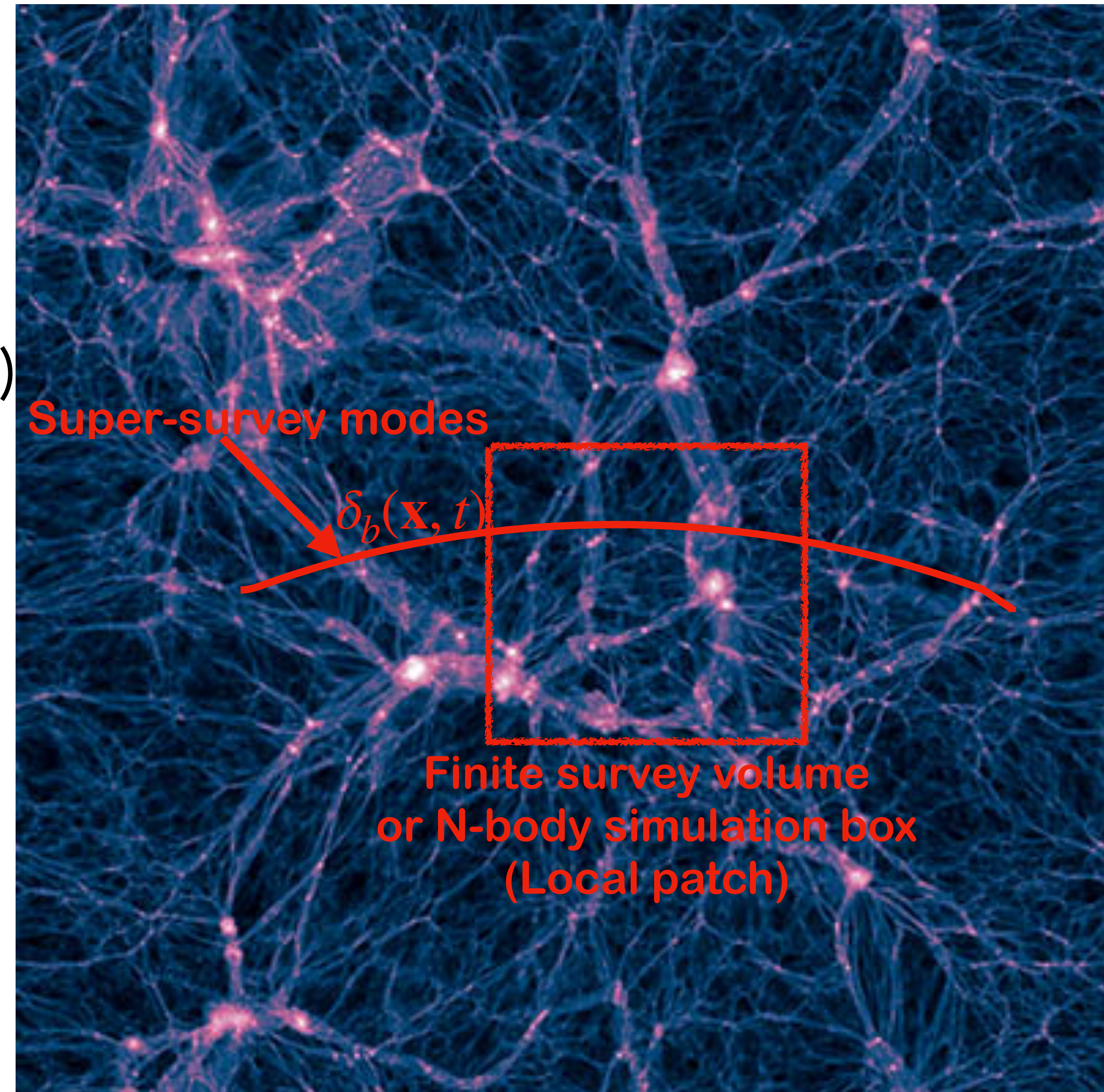
In collaboration with Masahiro Takada(Kavli IPMU) and Ryuichi Takahashi(Hirosaki University)

2021/11/19 第10回観測的宇宙論ワークショップ

Super-survey modes

<https://www.illustris-project.org>

- Super-survey modes: 有限領域(Local patch)を超える超長波長密度揺らぎ
 - モードカップリングにより、領域内の観測量に影響を与える(Takada & Hu 13) (Super-sample effects)
- Super-survey modes の構造形成への影響をcalibrate したい

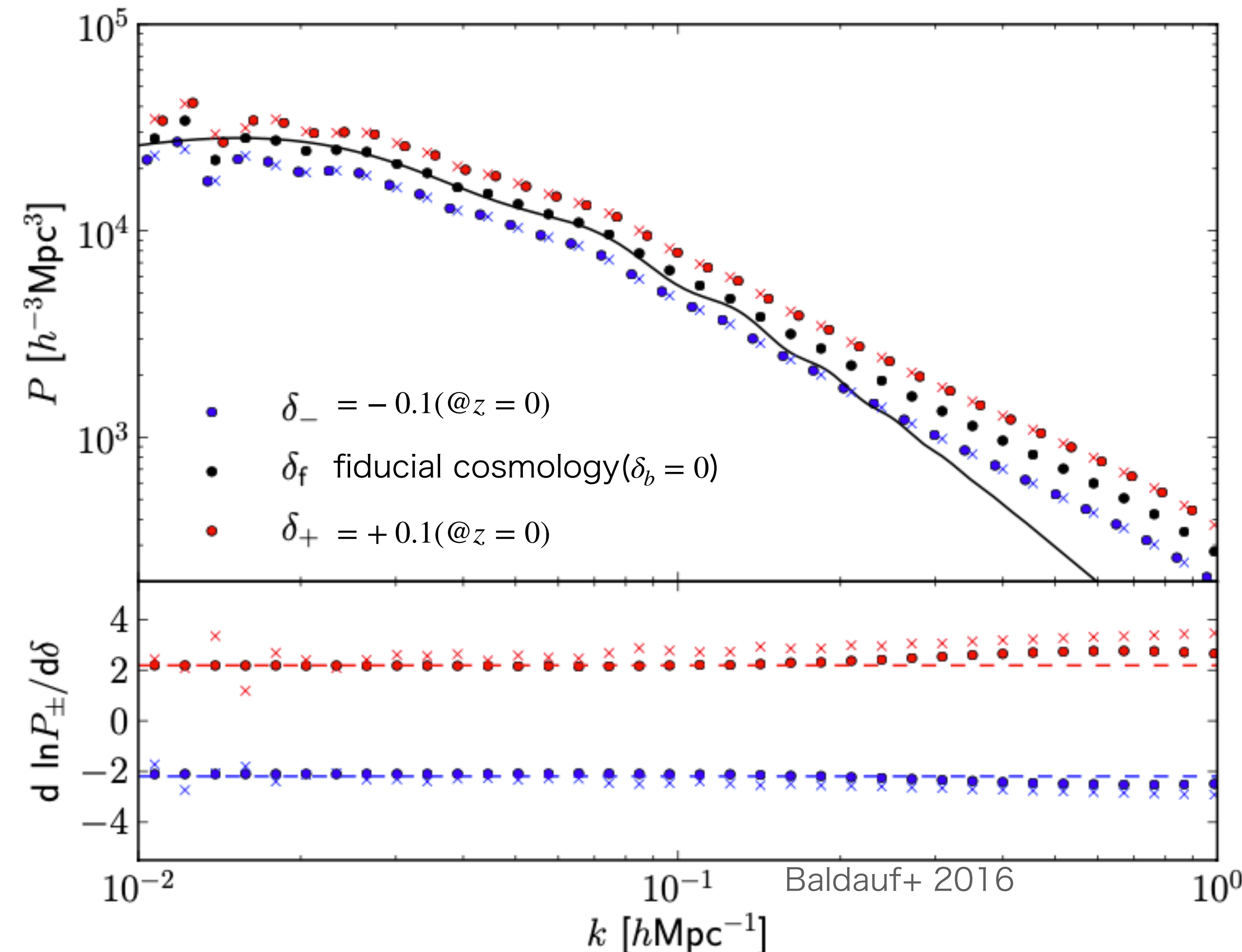


Super-survey modes に対するパワースペクトルの応答

- Super-survey modesがある Local patch で測ったパワースペクトルは宇宙全体の平均からずれる：

$$P(k; \delta_b(\mathbf{x}, t)) = P(k; \delta_b(\mathbf{x}, t) = 0) \left[1 + \underbrace{\frac{\partial \ln P(k)}{\partial \delta_b} \delta_b(\mathbf{x}, t)}_{\text{応答(response)}} \right]$$

$$\left. \frac{\partial \ln P(k; \delta_b)}{\partial \delta_b} \right|_{k=k_{\text{evolved}}} = \underbrace{\left. \frac{\partial \ln P(k; \delta_b)}{\partial \delta_b} \right|_{k=k_{\text{seed}}}}_{\text{Growth}} + \underbrace{\frac{\partial \ln P(k)}{\partial \ln k} \frac{\partial \ln k}{\partial \delta_b}}_{\text{Dilation}}$$



Super-Sample Covariance(SSC)/Super Sample Signal

- ・ パワースペクトルを用いる宇宙論解析では、Super-survey modes の影響を考慮するのが標準的になっている(HSC,DES,...)

1. Super-survey modes の分、誤差が増えたを考える

$$C_{ij} = C_{ij}^G + C_{ij}^{NG} + \underline{C_{ij}^{SSC}}, \quad C_{ij}^{SSC} = \frac{\partial \ln P(k_i)}{\partial \delta_b} \frac{\partial \ln P(k_j)}{\partial \delta_b} \sigma_b^2 \quad \sigma_b^2 = \langle \delta_b^2(t) \rangle$$

2. パワースペクトルのmodelのパラメータに含める

$$P(k; \theta_{\text{cosmo}}) \rightarrow P(k; \theta_{\text{cosmo}}, \underline{\delta_b(t)}) = P(k; \theta_{\text{cosmo}}, \delta_b(t) = 0) \left[1 + \frac{\partial \ln P(k; \theta_{\text{cosmo}})}{\partial \delta_b} \delta_b(t) \right]$$

Separate universe simulation

- Super-survey modesを 一様等方と近似 $\delta_b(\mathbf{x}, t) \simeq \delta_b(t)$
- Separate universe picture : Super-survey modes の効果を背景宇宙のパラメータで吸収する

$$\bar{\rho}_{mW}(t) = \bar{\rho}_m(t)[1 + \delta_b(t)], \quad \bar{\rho}_{mW}a_W^3 = \bar{\rho}_ma^3 \rightarrow a_W(t) \approx a(t) \left(1 - \frac{\delta_b(t)}{3} \right), \quad \Omega_{K,W} = -\frac{5\Omega_m}{3} \frac{\delta_b}{D},$$

$(\Omega_b h^2, \Omega_c h^2, A_s, n_s)$ fixed (transfer function fixed)

同じ initial seed を持つ paired simulation を行う

$$\left. \frac{\partial \ln P(k)}{\partial \delta_b} \right|_{sim} = \frac{\ln P_+(k) - \ln P_-(k)}{\delta_{b,+} - \delta_{b,-}}$$

Λ CDM background の場合、曲率を入れたことと等価 $P(k; \Omega_K) = P(k; \Omega_K = 0) \left[1 + \frac{\partial \ln P}{\partial \Omega_K} \delta \Omega_K \right]$

h response simulation

- flatness を保ちながら現在のハッブルパラメータの値を少し変えた宇宙論を考える

$$h \rightarrow h' = h + \delta h, \quad (\Omega_K = 0, \Omega_b h^2, \Omega_c h^2, A_s, n_s) \text{ fixed (transfer function fixed)}$$

同じ initial seed を持つ paired simulation を行う

$$\Omega'_\Lambda = 1 - \Omega'_m = 1 - \left(\frac{h}{h'}\right)^2 \Omega_m$$

- Ω_Λ の変化により linear growth factor が変化し、 $\delta h > 0$ の場合は成長が遅くなる

$$\frac{d \ln P(k)}{dh} = \underbrace{\frac{\partial \ln P_W(k_W)}{\partial h}}_{\text{Growth}} + \underbrace{\frac{1}{h} \frac{\partial \ln P(k)}{\partial \ln k}}_{\text{Dilation}} \quad k[h/\text{Mpc}], \quad k_W = \frac{h}{h'} k[h'/\text{Mpc}] \quad (/ \text{Mpc で同じ値})$$

- Super-survey modes と似た効果

matter power spectrum **growth response**

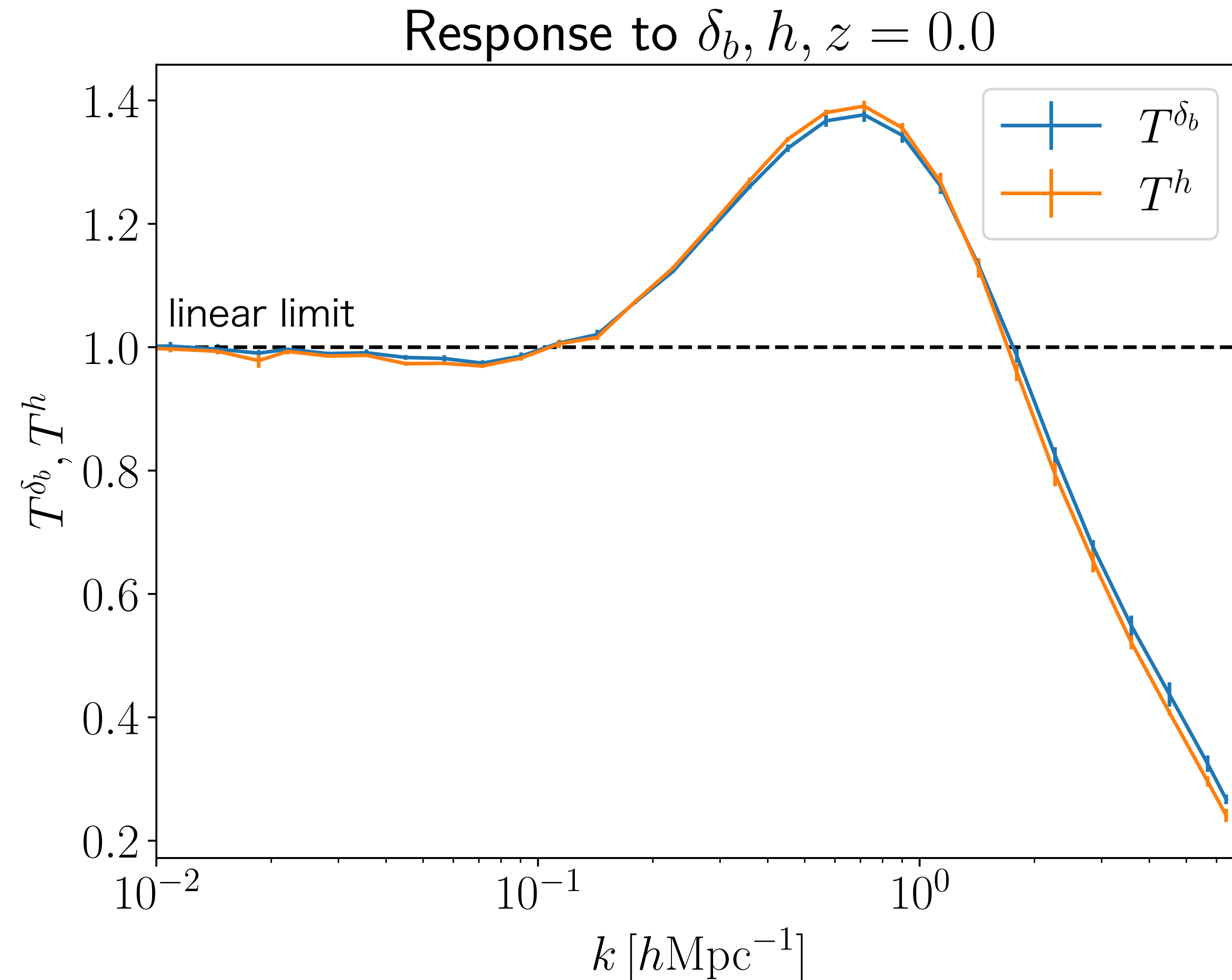
- **growth response**のみ考える
- fiducial cosmology (Planck) の周りで
paired SU simulation ($\delta_b = \pm 0.01 (@z = 0)$) と
paired h response simulation ($\delta h = \pm 0.02$)

- $$\frac{\partial \ln P(k)}{\partial h} \rightarrow \frac{\partial \ln P_L(k)}{\partial h} = 2 \frac{\partial \ln D}{\partial h},$$
$$\frac{\partial \ln P(k)}{\partial \delta_b} \rightarrow \frac{\partial \ln P_L(k)}{\partial \delta_b} = 2 \frac{\partial \ln D}{\partial \delta_b} \simeq \frac{26}{21} \quad (k \rightarrow 0 \text{ limit})$$

- $$\frac{\partial \ln P(k)}{\partial h} = \frac{\partial \ln P_L(k)}{\partial h} T^h = 2 \frac{\partial \ln D}{\partial h} T^h,$$
$$\frac{\partial \ln P(k)}{\partial \delta_b} = \frac{\partial \ln P_L(k)}{\partial \delta_b} T^{\delta_b} = 2 \frac{\partial \ln D}{\partial \delta_b} T^{\delta_b}$$

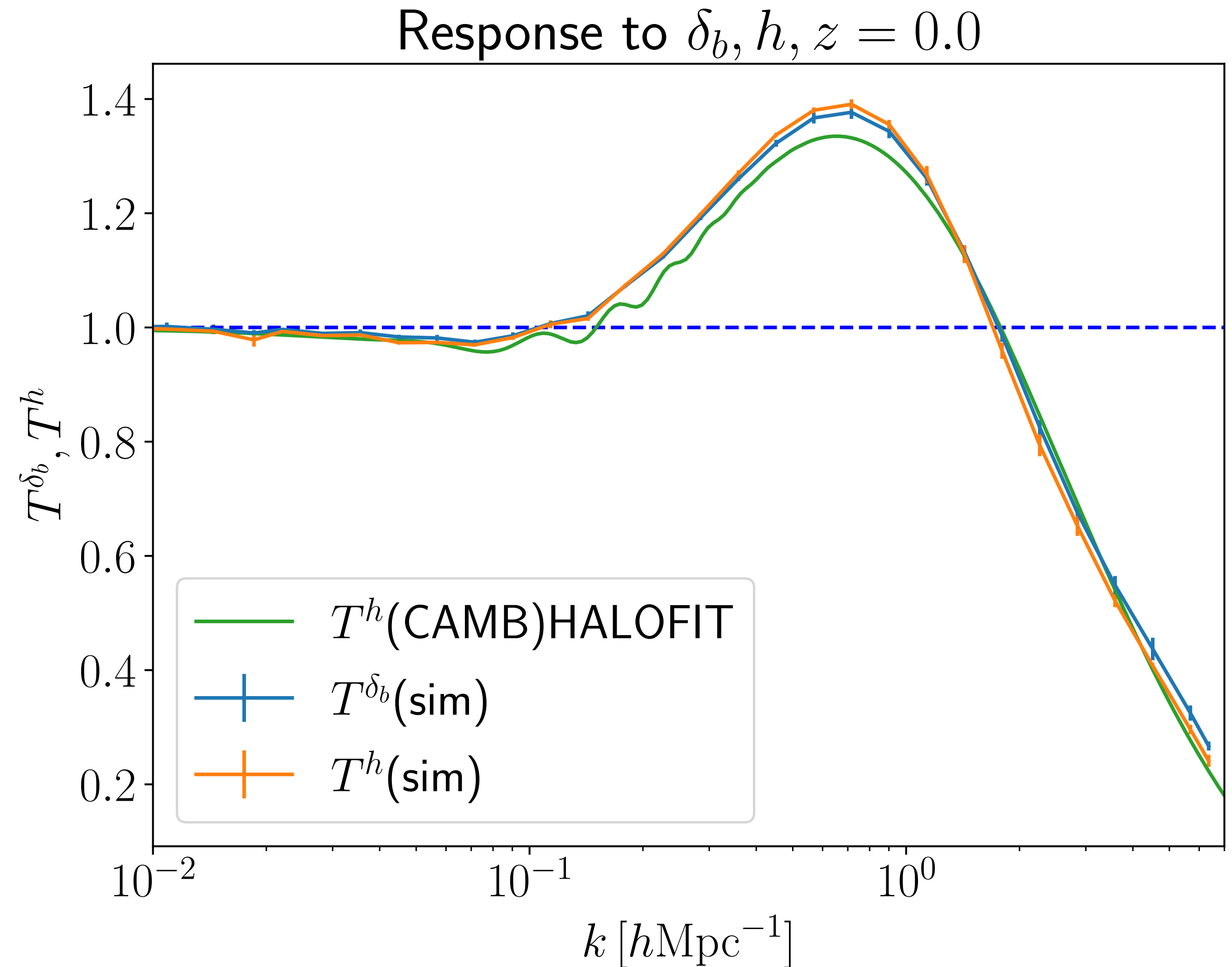
T^{δ_b}, T^h : linearized response of power spectrum

- $T^h \simeq T^{\delta_b}$ (confirmed the results of Li et al. 14b)
7 h response と δ_b response はよく一致している !



Emulator response

- flat- Λ CDM モデルのパワースペクトルを预言する既存のツール(CAMB, Dark Emulator(Nishimichi et al. 19) 等) を使ってh response は計算できる
- non-flat simulation をやらなくても、 δ_b response(即ち Ω_K response) は emulator の h response で高速に計算できる



responseの等価性

- ・ 非線形パワースペクトルが線形パワースペクトルの汎関数なら identical (Li et al. 14)
- ・ 初期パワースペクトルは固定 $\rightarrow D$ のみ変化する $P_L(k) = D^2 P_0(k)$
- ・ $P_{NL}(k) = F[P_L(k)]$ とすると、

$$\begin{aligned}\frac{\partial \ln P_{NL}(k)}{\partial h} &= \frac{\partial \ln P_L(k)}{dh} \frac{\partial \ln P_{NL}(k)}{\partial \ln P_L(k)} \\ &= 2 \frac{\partial \ln D}{dh} \frac{\partial \ln P_{NL}(k)}{\partial \ln P_L(k)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \ln P_{NL}(k)}{\partial \delta_b} &= \frac{\partial \ln P_L(k)}{\partial \delta_b} \frac{\partial \ln P_{NL}(k)}{\partial \ln P_L(k)} \\ &= 2 \frac{d \ln D}{d \delta_b} \frac{d \ln P_{NL}(k)}{d \ln P_L(k)}\end{aligned}$$

$$\rightarrow \frac{\partial \ln P_{NL}(k)}{\partial \ln P_L(k)} = T^h(k) = T^{\delta_b}(k)$$

Hamilton+ 91, Peacock & Dodds 93, 96 ...

responseの等価性

• h response と δ_b response の一致 $\rightarrow P_{NL}(k) = F[P_L(k)]$ の間接的な証明

• 摂動論

$$P_{SPT}(k) = P_L(k) + P^{(22)}(k) + 2P^{(13)}(k) = F[P_L(k)]$$

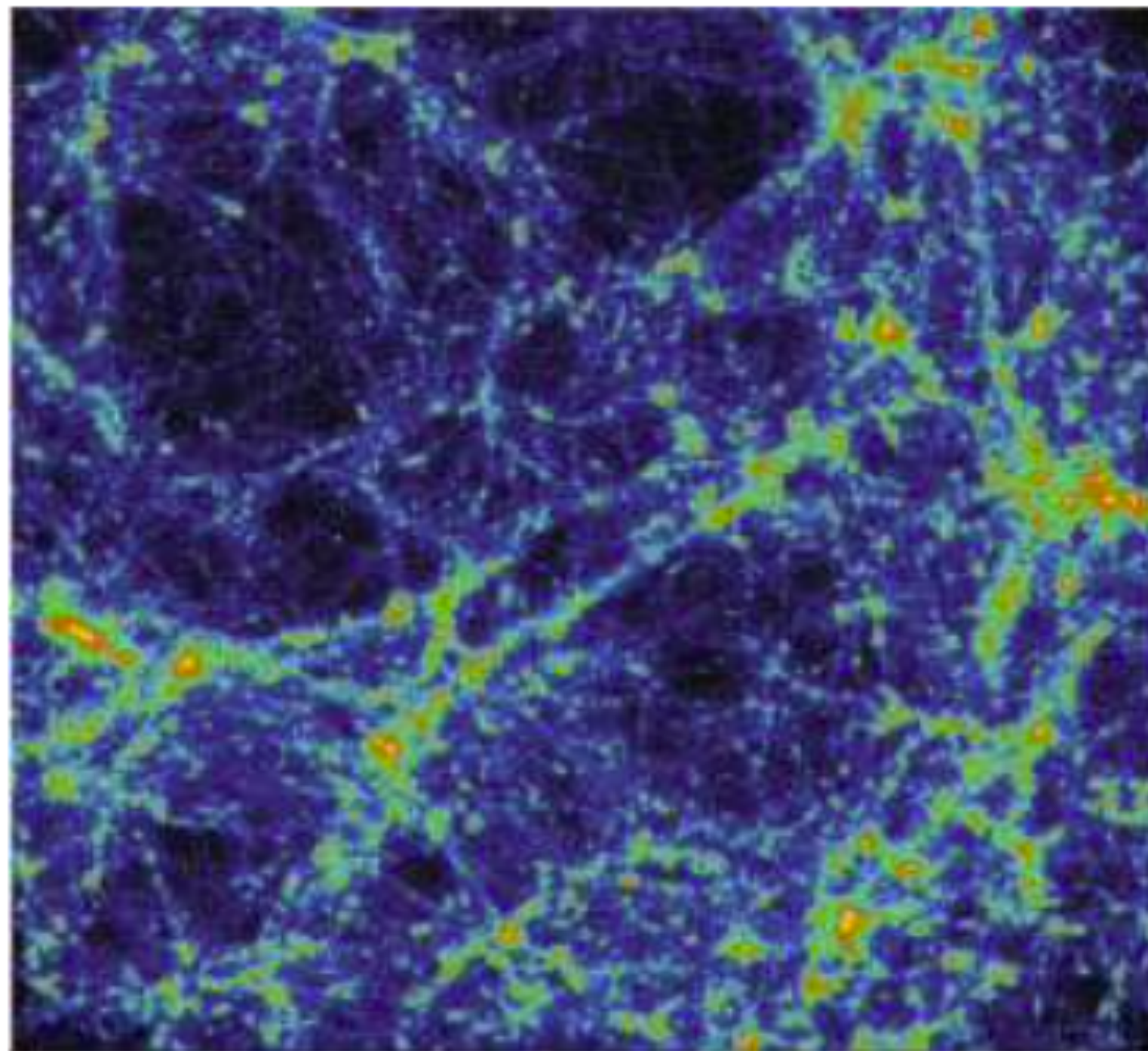
$$P^{(22)}(k) = 2 \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} [F_2(\mathbf{p}, \mathbf{k} - \mathbf{p})]^2 P_L(p) P_L(|\mathbf{k} - \mathbf{p}|)$$

$$P^{(13)}(k) = 3P_L(k) \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} [F_3(\mathbf{p}, -\mathbf{p}, \mathbf{k})] P_L(p)$$

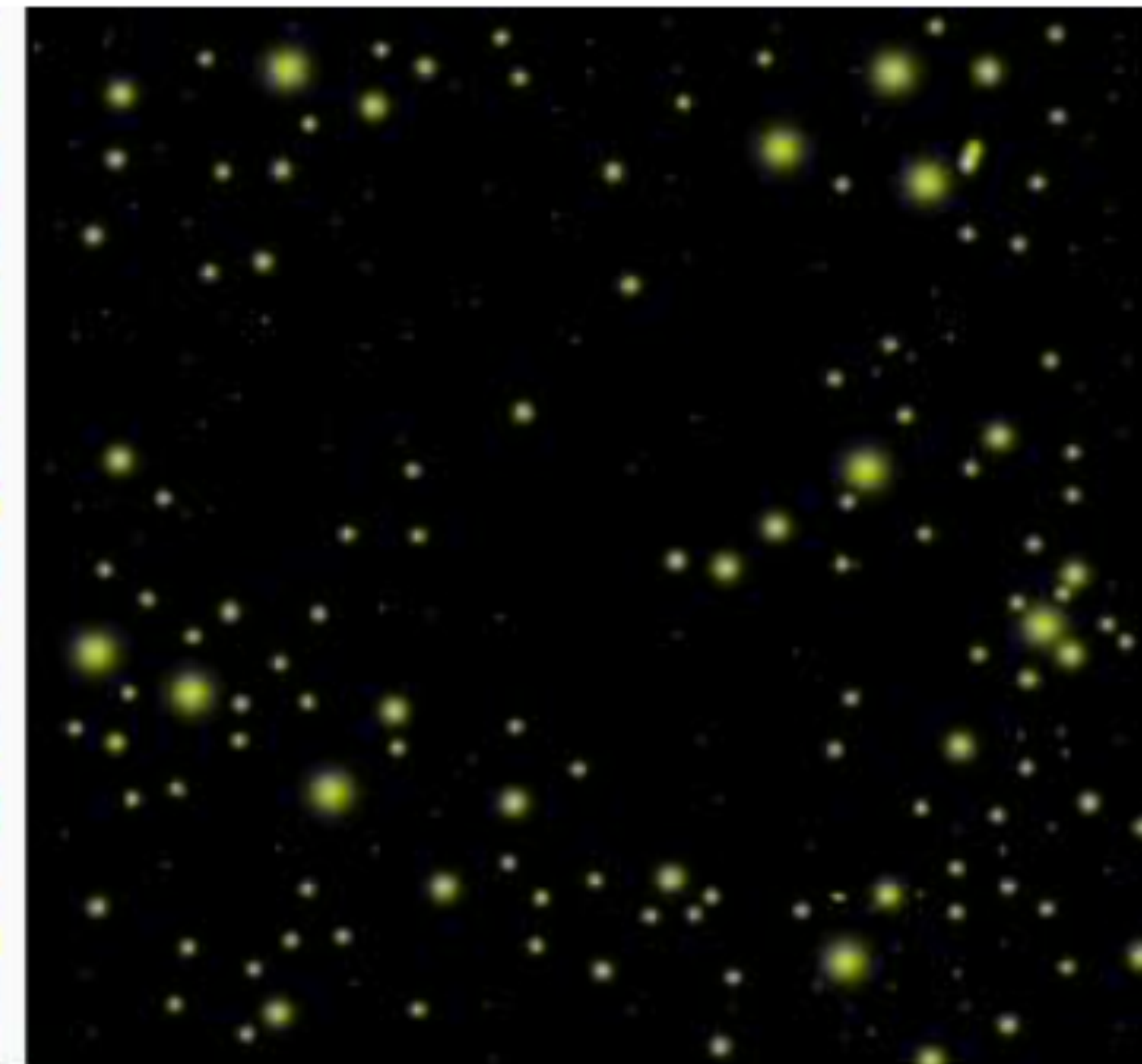
ハローモデル

- ・ 現象論的モデル
- ・ 全てのDM粒子がハローに属すと
仮定 → パワースペクトルをHalo
propertyと $P_L(k)$ のみで記述
できる
- ・ Halo property:
 - ・ ハロー密度プロファイル $\rho(r|M) = Mu_M(r|M)$
 - ・ ハロー質量関数 $n(M)$
 - ・ ハローバイアス $b_1(M)$

実際のDM分布



Halo model view



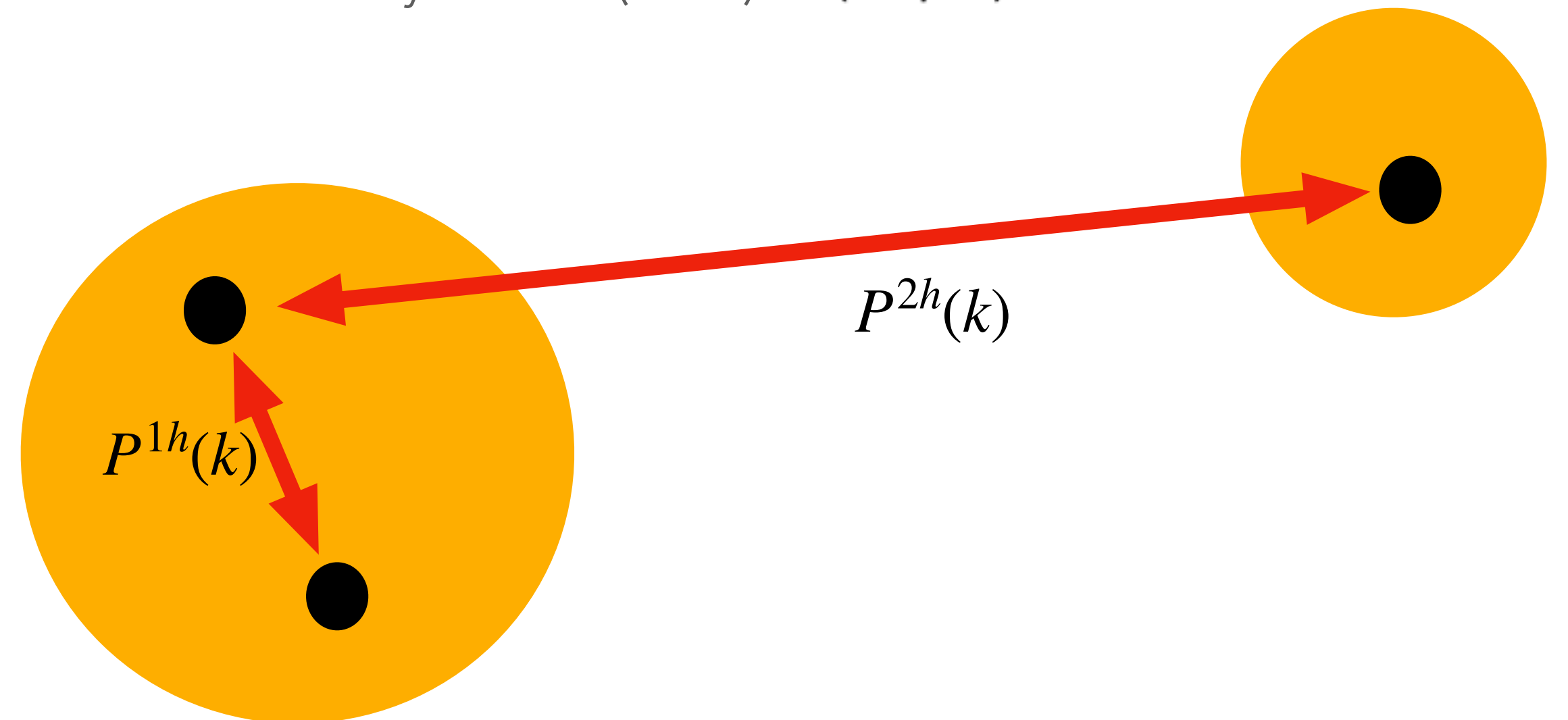
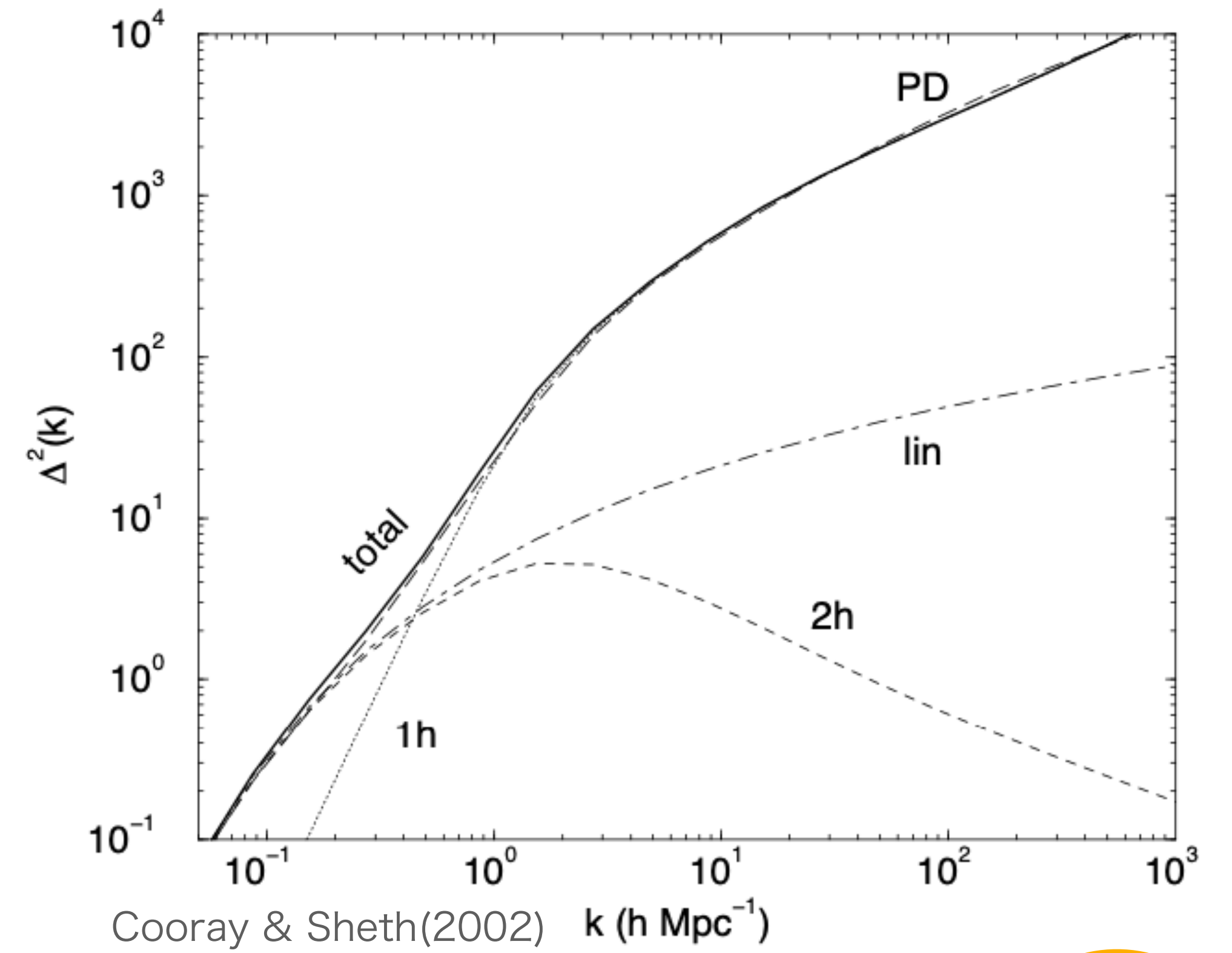
Cooray & Sheth(2002)

ハローモデル

- $P(k) = P^{1h}(k) + P^{2h}(k)$

$$P^{1h}(k) = \int dM n(M) \left(\frac{M}{\bar{\rho}_m} \right)^2 u_M(k)^2$$

$$P^{2h}(k) = \left[\int dM n(M) \left(\frac{M}{\bar{\rho}_m} \right) b_1(M) u_M(k) \right]^2 P_L(k)$$



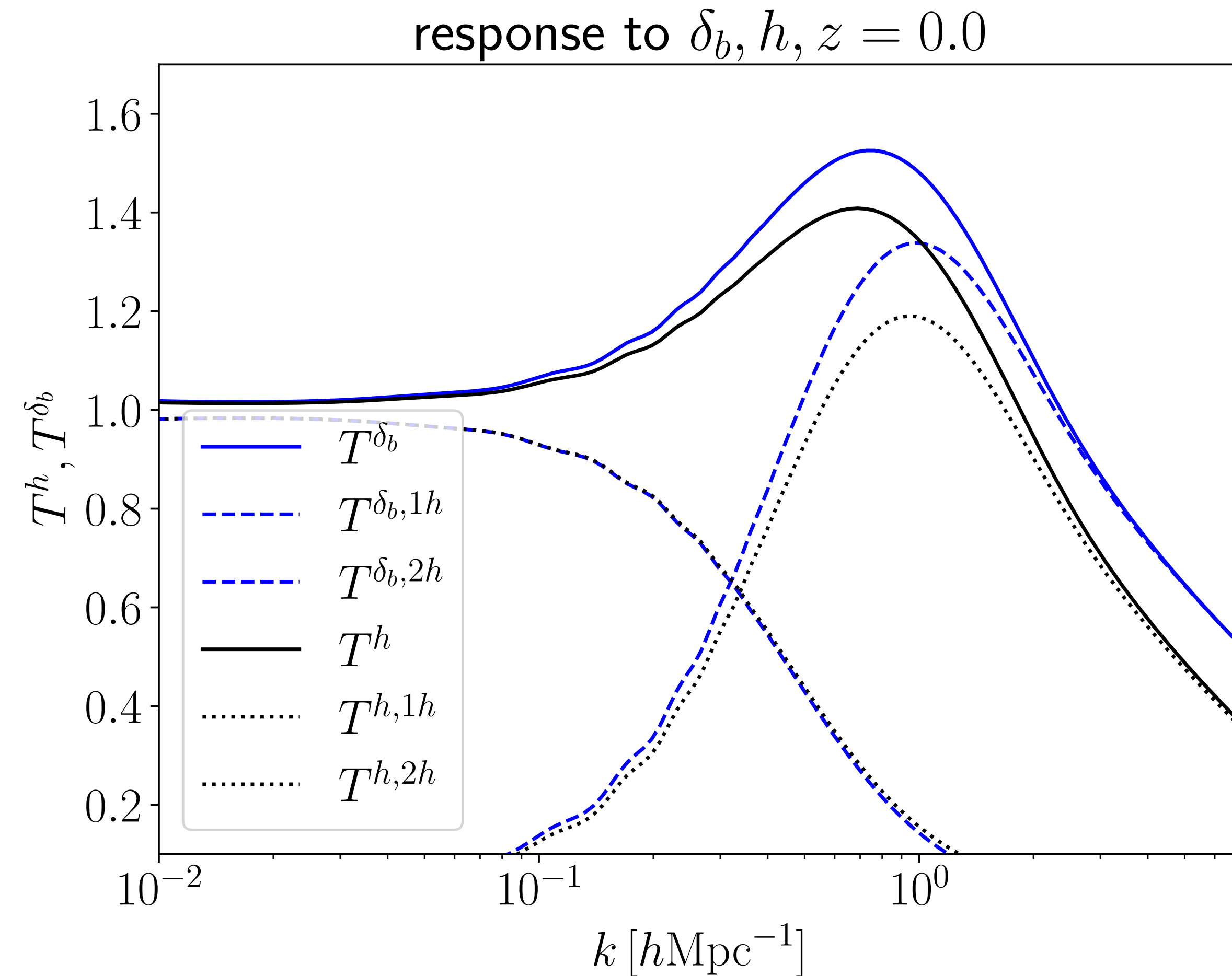
ハローモデルによる response の計算

- ・ パワースペクトルの response の形状を説明できる

- ・
$$\frac{\partial P^{1h}(k)}{\partial \delta_b} = \int dM n(M) \frac{\partial \ln n(M)}{\partial \delta_b} \left(\frac{M}{\bar{\rho}_m} \right)^2 u_M(k)^2$$

response の山：平均密度の高い宇宙でハローの数密度が多くなる効果

- ・ h response と δ_b response の等価性をハローモデルの枠組みで示すことはまだできていない



まとめ

- パワースペクトルのSuper-survey modes への応答と h の変化への応答はよく一致する $\rightarrow \delta_b$ (or Ω_K)response の代わりに h response を使うことができる
- response の等価性は非線形パワースペクトルが線形パワースペクトルの汎関数であることと関係している
- ハローモデルはresponse の振る舞いを定性的に理解するのに有用
- ハローモデルでresponse の等価性を説明できないか検討している
もう少し複雑なハローモデル(例えば、摂動論と整合的なハローモデル (Valageas & Nishimichi 10))が必要かもしれない

以下 予備スライド

Separate universe

- Local Patchから見ると、Super-Survey modeは場所や方向によらず**一様等方と近似**できる

$$\rightarrow \delta_b(\mathbf{x}, t) \simeq \bar{\delta}_b(t)$$

- 平均密度が高い宇宙(Separate universe)を考えているのと等価になる

Local Patch

$$\bar{\rho}_L(t) = \bar{\rho}_G(t)[1 + \bar{\delta}_b(t)]$$

- 平均密度が高い宇宙は膨張が遅くなる

$$\bar{\rho}_L a_L^3 = \bar{\rho}_G a_G^3 \rightarrow a_L(t) \approx a_G(t) \left(1 - \frac{\bar{\delta}_b(t)}{3} \right)$$

A diagram illustrating the concept of a 'Local Patch' in a 'Separate universe'. A red rectangular box is labeled 'Local Patch' in red text above it. Inside the box, the equation $\bar{\rho}_L(t) = \bar{\rho}_G(t)[1 + \bar{\delta}_b(t)]$ is written, with $\bar{\delta}_b(t)$ underlined. Above the box, the label $\bar{\delta}_b(t)$ is written, and below the box, the label $\bar{\rho}_G(t)$ is written. A curved line passes through the box, representing the boundary of the patch.

Growth & Dilation in separate universe

- $\delta_b(\mathbf{x}, t) \simeq \bar{\delta}_b(t)$ とすると、

$$\delta_{L,linear}(t) \propto D_L(t) = D_G(t) \left[1 + \frac{13}{21} \bar{\delta}_b(t) \right]$$

→ Growth effect

→ 揺らぎの成長が促進/抑制される

- スケールファクターの変化により、共動座標、共動波数 が変化する：

$$r^{phy} = a_L x_L = a_G x_G \rightarrow x_G = x_L \left(1 - \frac{\bar{\delta}_b(t)}{3} \right), k_G = k_L \left(1 + \frac{\bar{\delta}_b(t)}{3} \right)$$

→ Dilation effect

→ BAO等の位置も変化する

How to do Simulation

Mpc 単位でcoming length が等しくなるようにする：

$$\frac{L_L[Mpc/h_L]}{h_L} = \frac{L_G[Mpc/h_G]}{h_G}$$

我々のシミュレーション

1 Gpc/h, $N = 2048^3$

Super-Sample Covariance

Li + 2014a

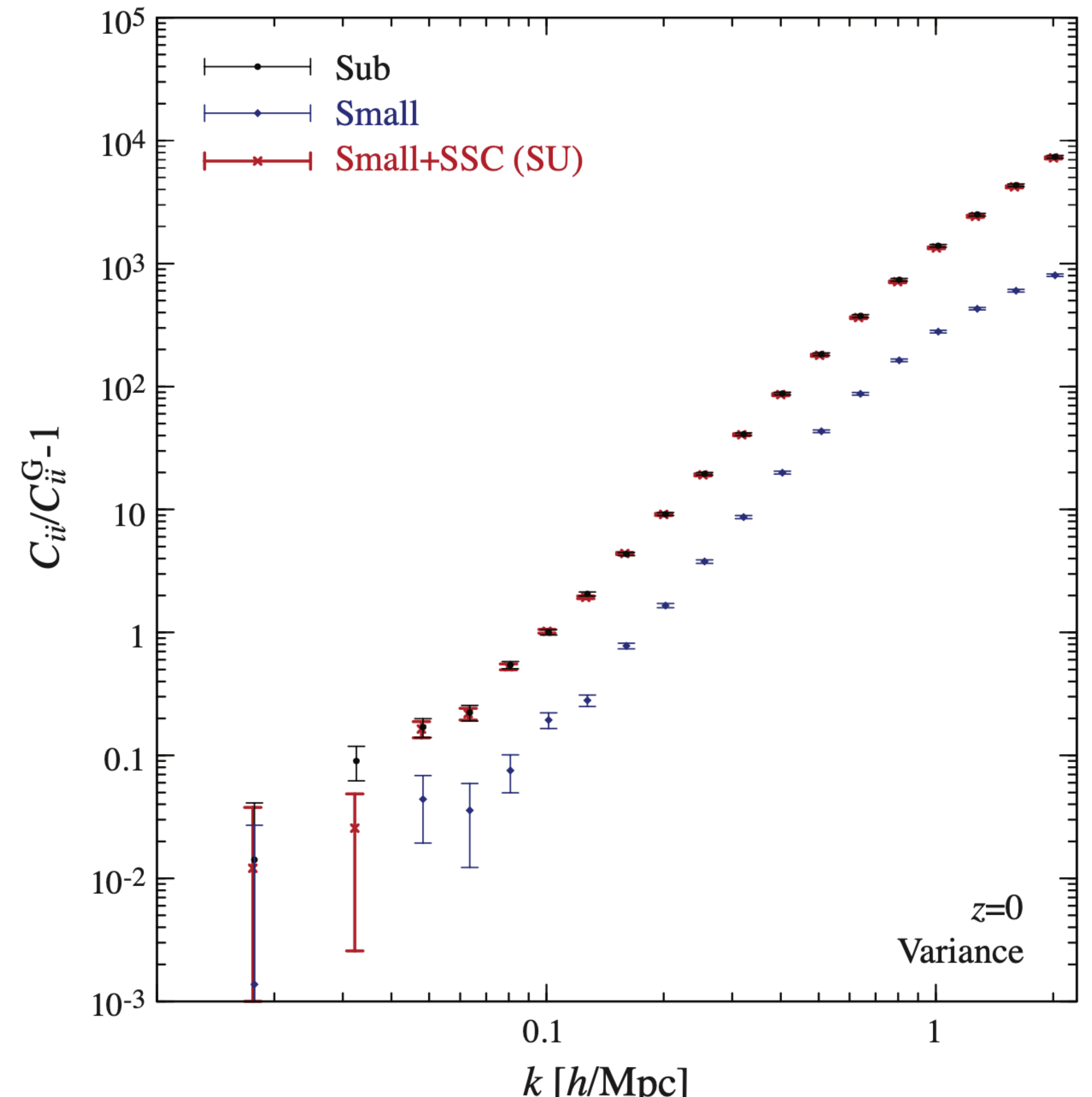
Super-survey mode との
モードカップリングによる項が
Covariance に加わる

$$C_{ij} = C_{ij}^G + C_{ij}^{NG} + \underbrace{C_{ij}^{SSC}}_{\text{New term}}$$

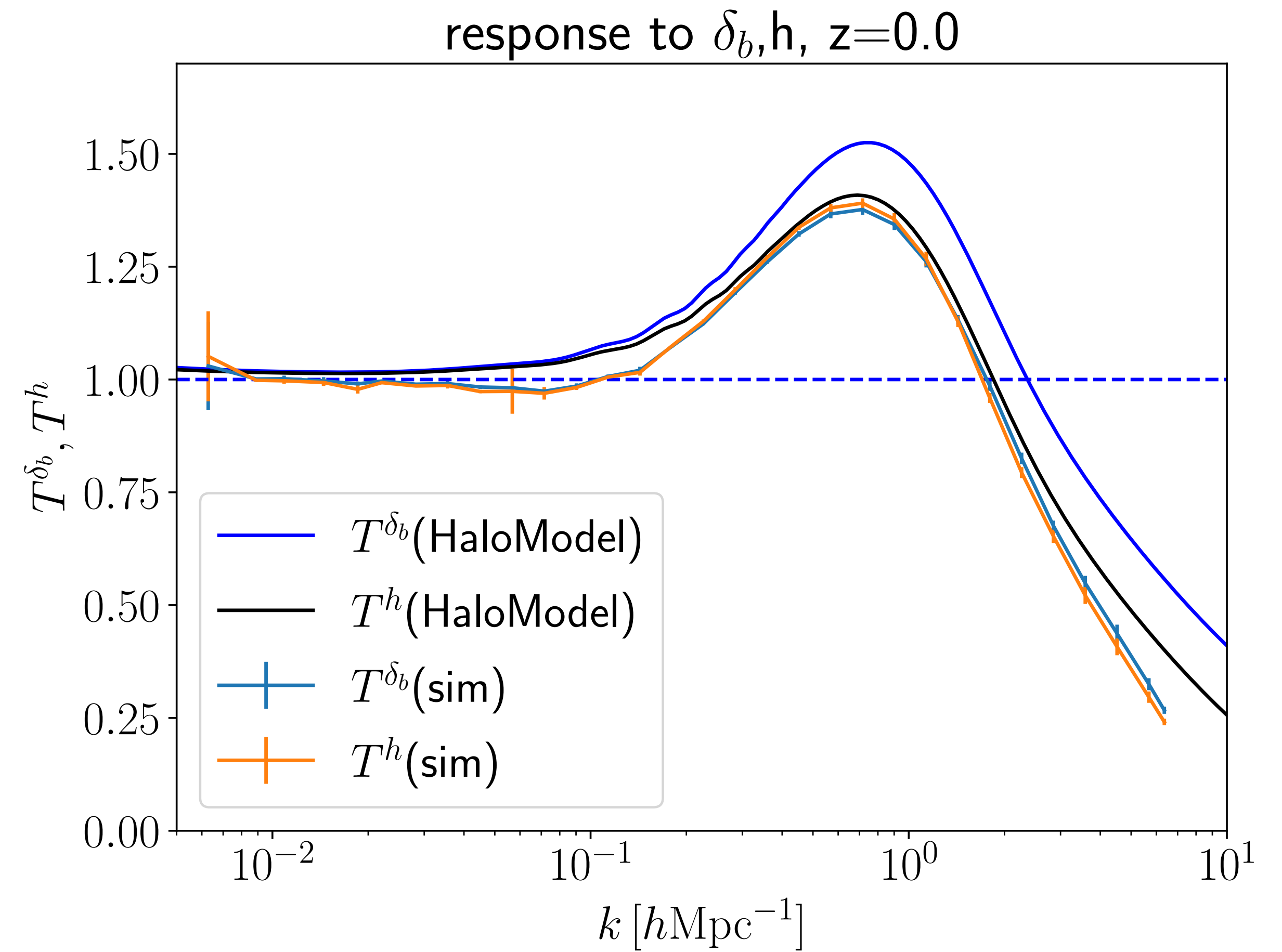
$$C_{ij}^{SSC} = \frac{d \ln P(k_i)}{d \delta_l} \frac{d \ln P(k_j)}{d \delta_l} \sigma_V^2$$

$$\sigma_b^2 = \langle \delta_b^2 \rangle = \frac{1}{V_W^2} \int \frac{d^3 \mathbf{q}}{(2\pi)^3} |W(\mathbf{q})|^2 P_L(q) \quad \sigma_8 \simeq 0.8$$

$$\sigma_b \propto V_W^{-1}$$

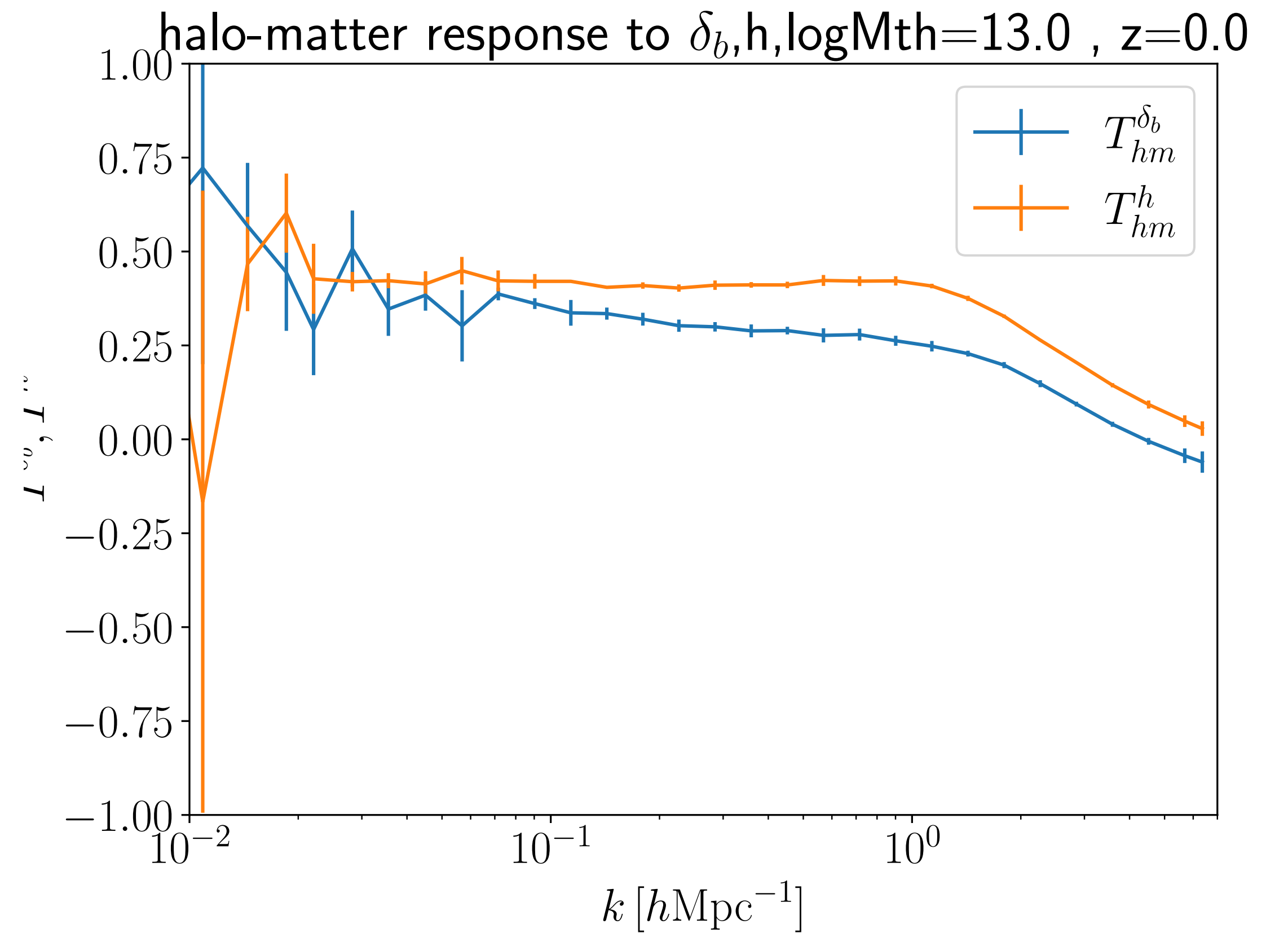
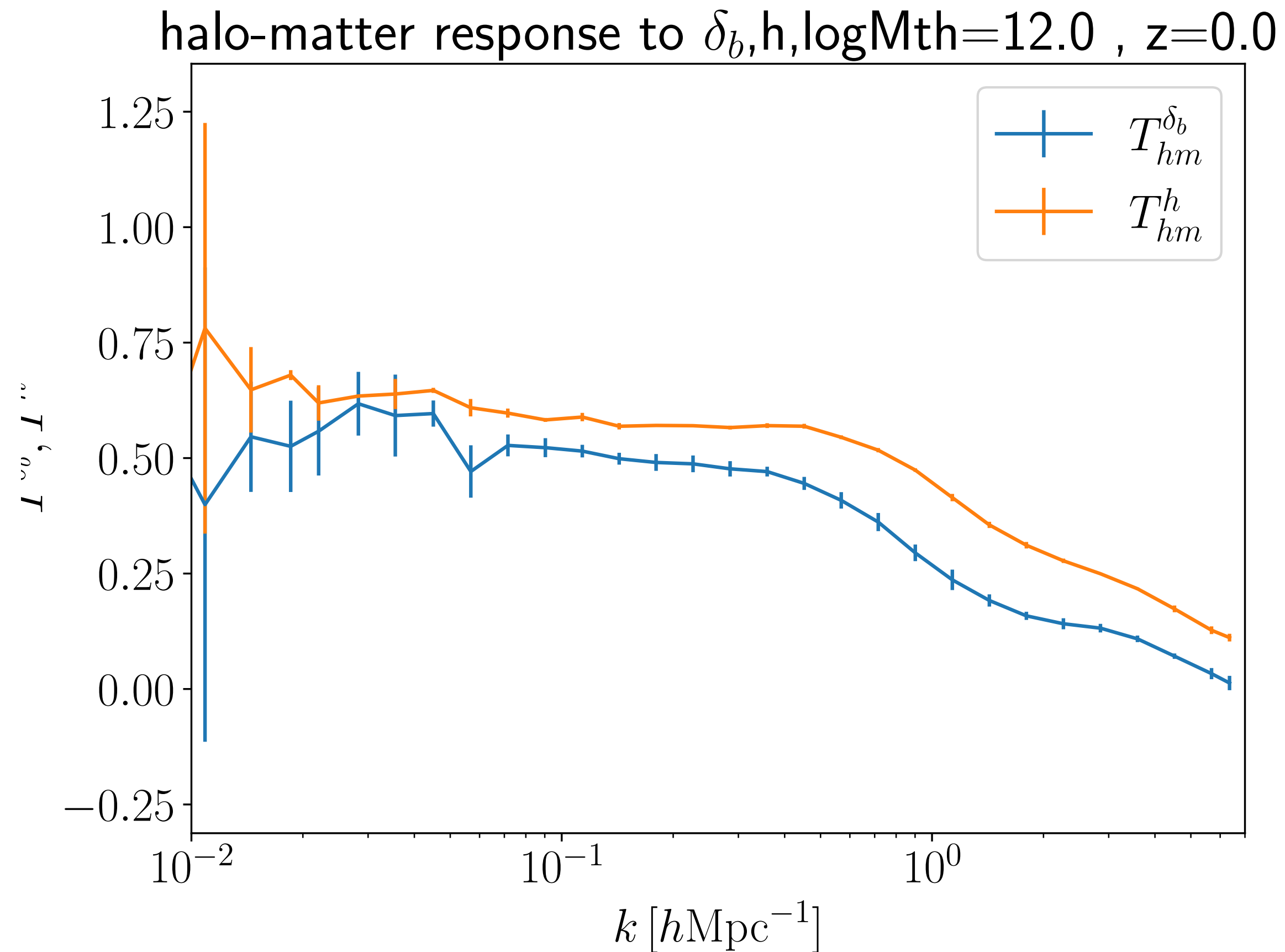


ハローモデル vs simulation

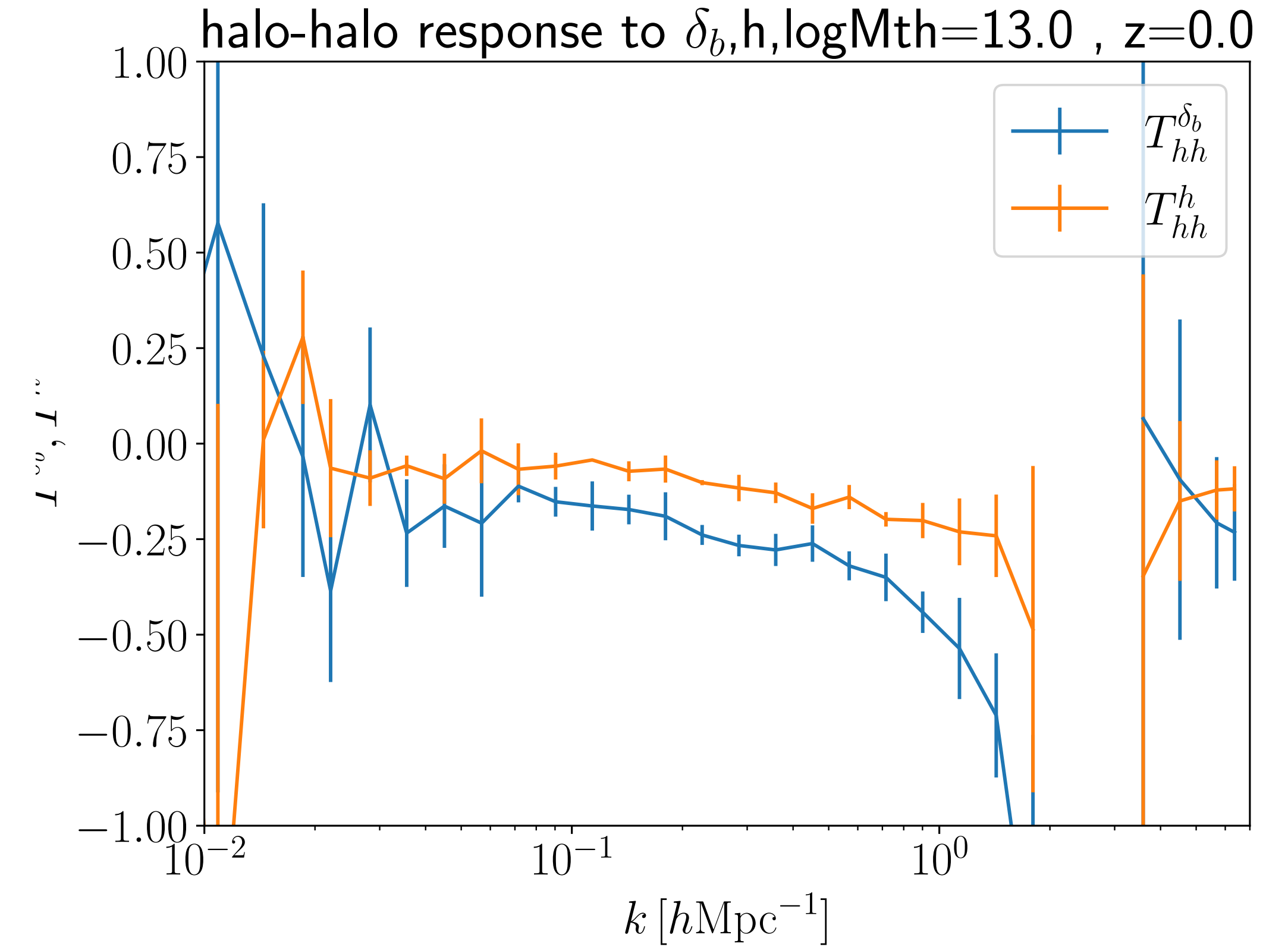
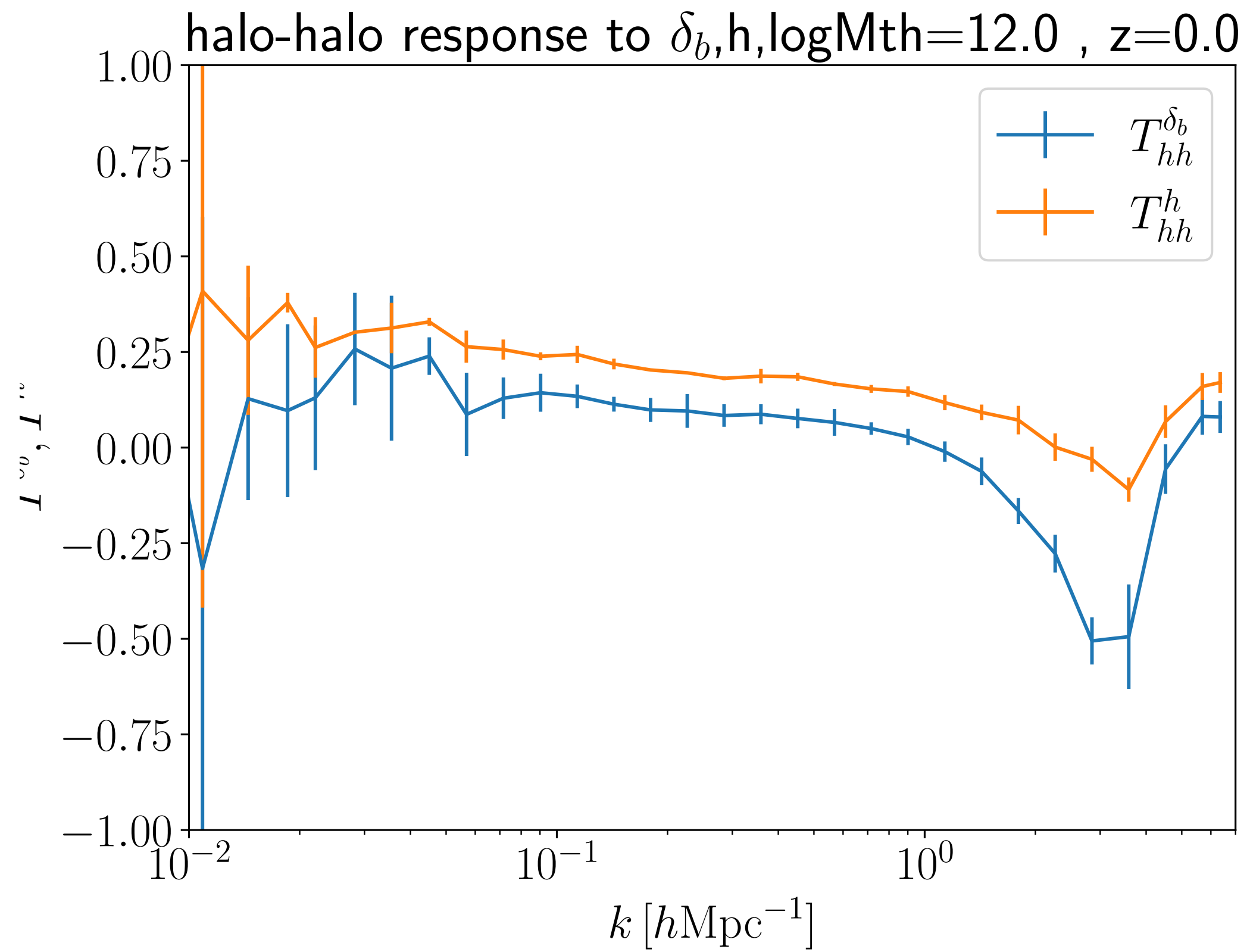


bias tracer

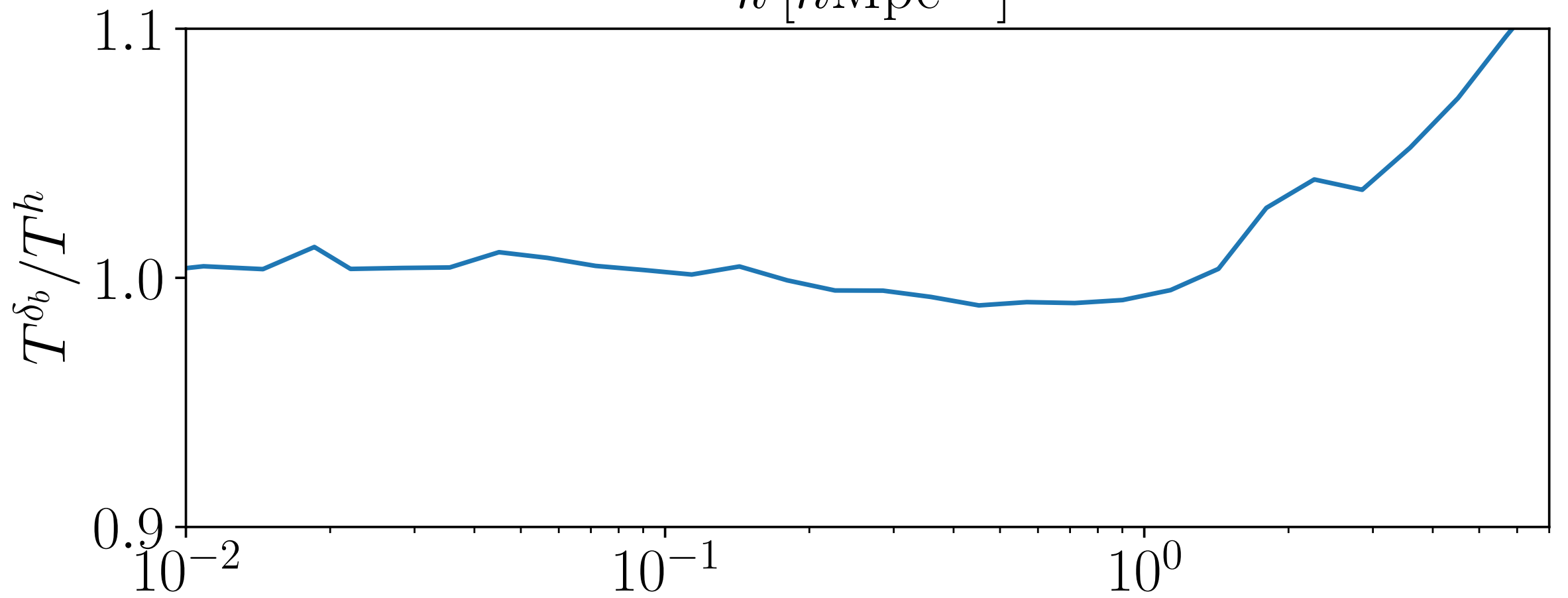
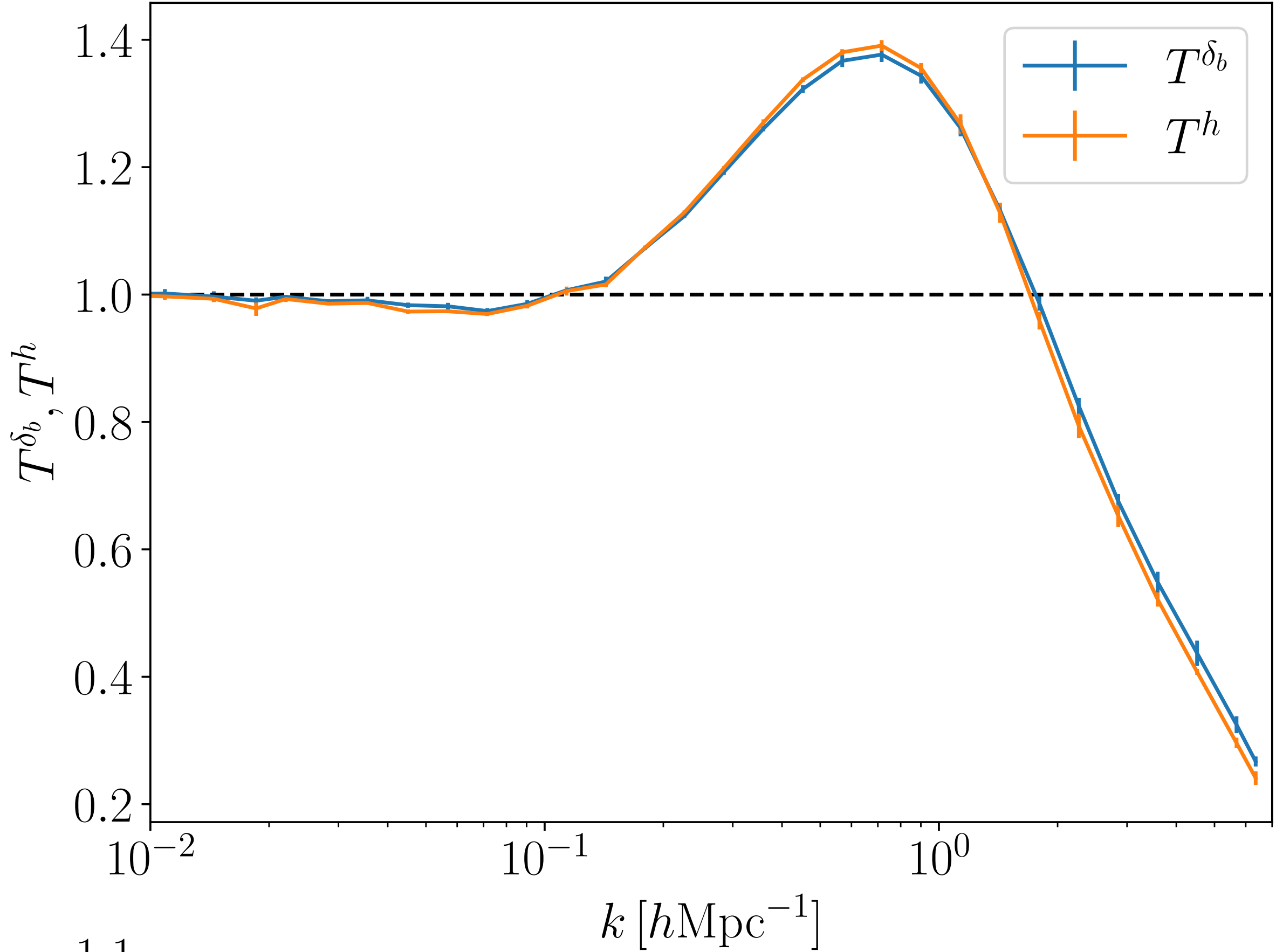
- $P_{hm}(k)$, $P_{hh}(k)$ のresponse
は一致しない



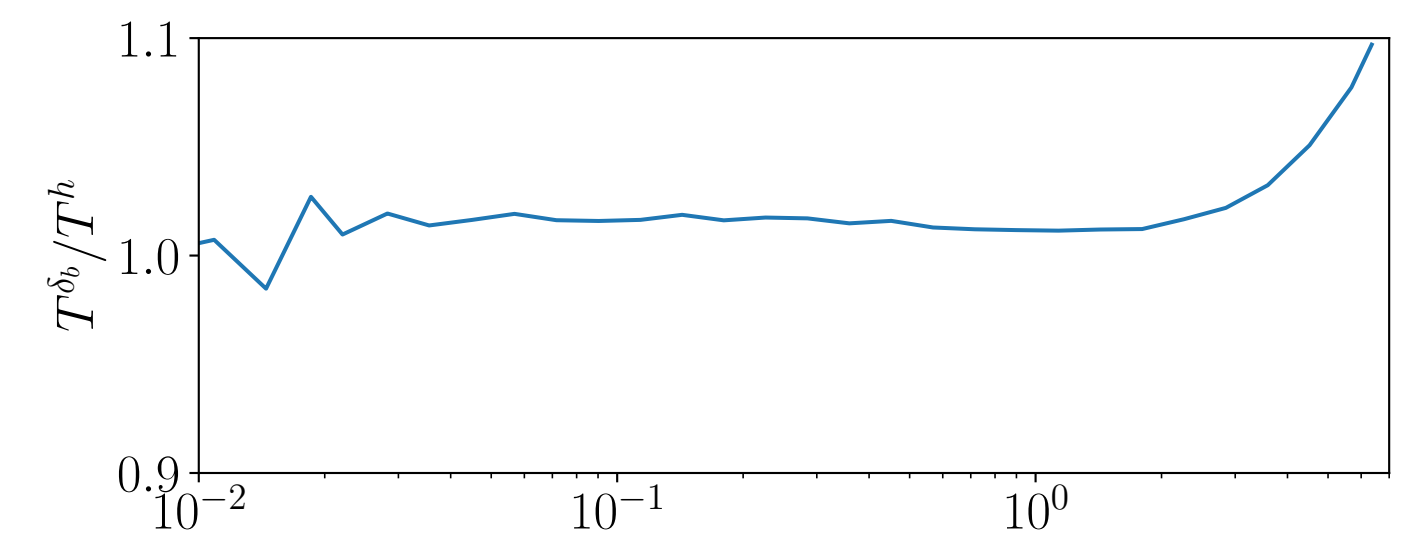
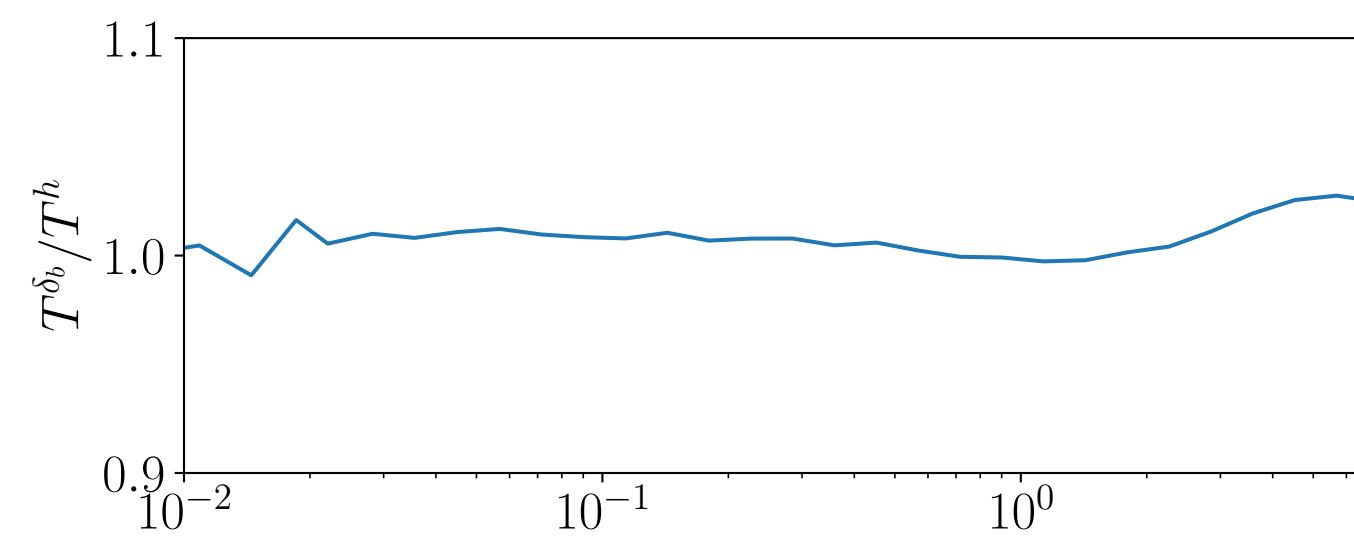
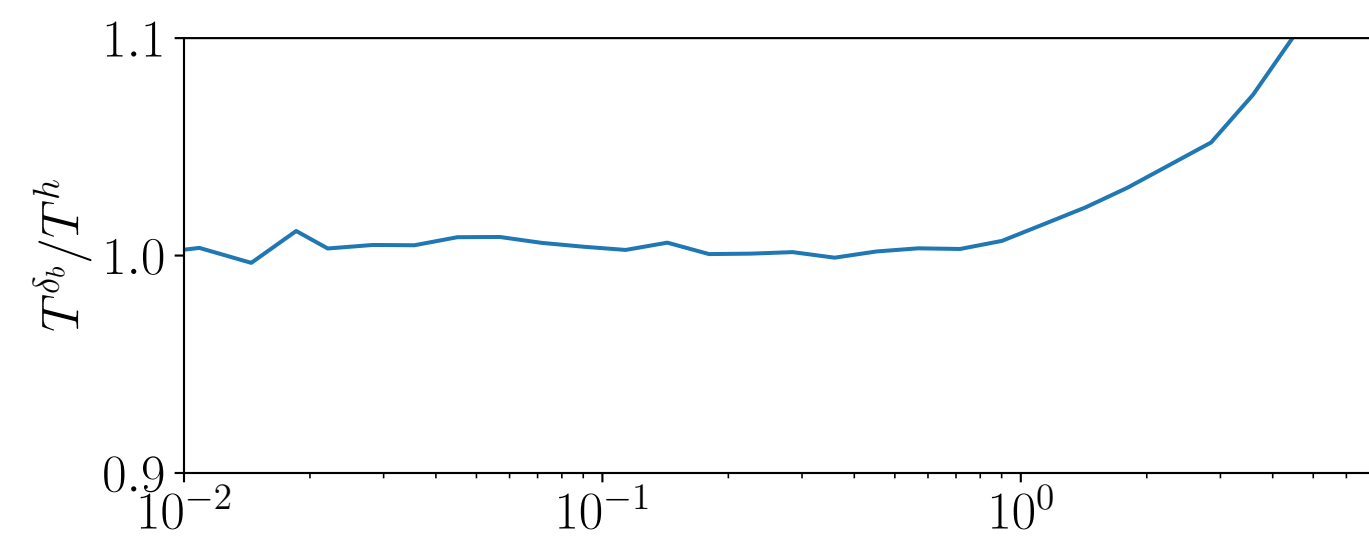
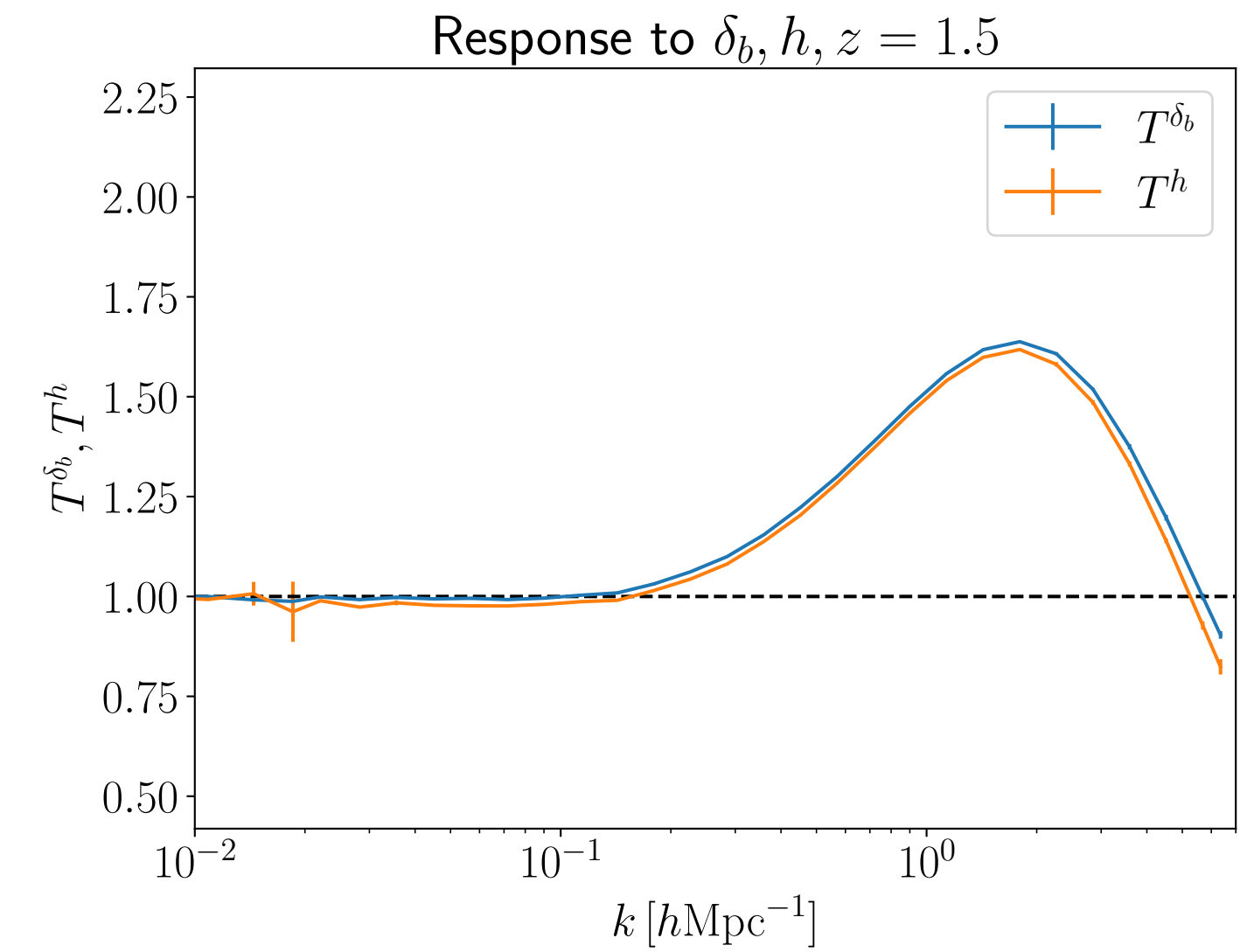
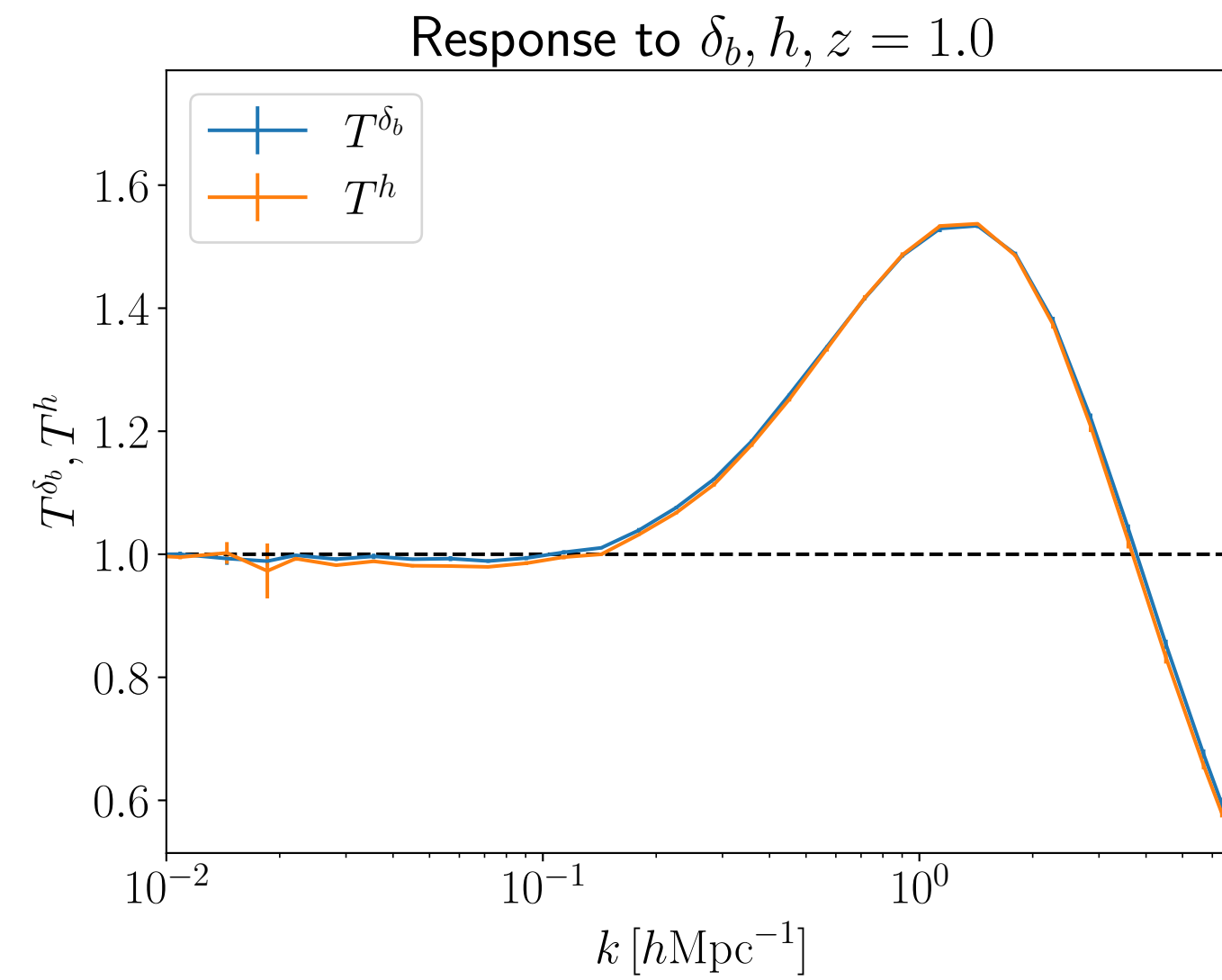
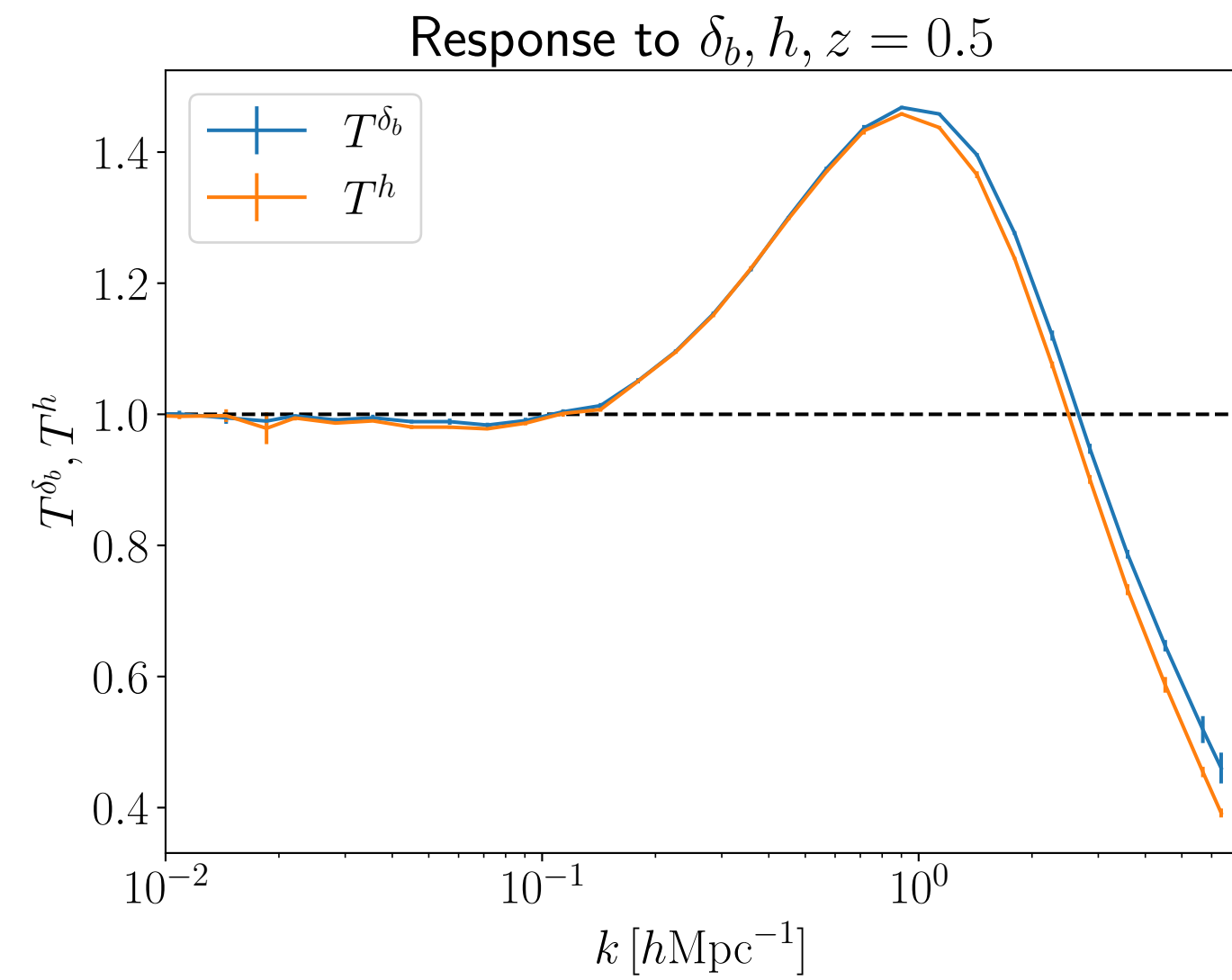
biased tracer



Response to $\delta_b, h, z = 0.0$



high- z でのresponse



Ω_K response

