

マルチトレーサー法を用いた 銀河バイスペクトル解析

共同研究者: 横山修一郎(立教大), 高橋慶太郎(熊本大)

山内 大介

神奈川大学 工学部 物理学教室

今回やったこと

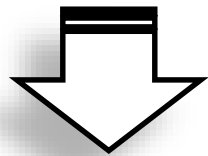
- ① マルチトレーサー法は銀河バイスペクトルでも効果的
- ② 複数トレーサーの場合の赤方偏移変形(monopole)
- ③ コズミックバリエーションを超えて、局所型でない非線形パラメータ ($f_{\text{NL}}^{\text{eq}}$, $f_{\text{NL}}^{\text{orth}}$) が決定できる

	eq	orth
Planck	43	21
Euclid	30.0	13.1
SKA2	23.0	10.2

コズミックバリエーション

➤ パラメータ θ の決定精度

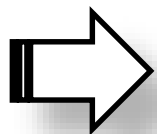
$$\sigma(\theta) = (F_{\theta\theta})^{-1/2} = (d\mathbf{P}/d\theta \cdot \text{Cov}[\mathbf{P}, \mathbf{P}]^{-1} \cdot d\mathbf{P}/d\theta)^{-1/2}$$



➤ 単一トレーサー解析: 振幅の決定精度

$$\sigma(\ln P) = (P \cdot (P + N^{-1})^{-2} \cdot P)^{-1/2} \rightarrow 1 + O(1/PN)$$

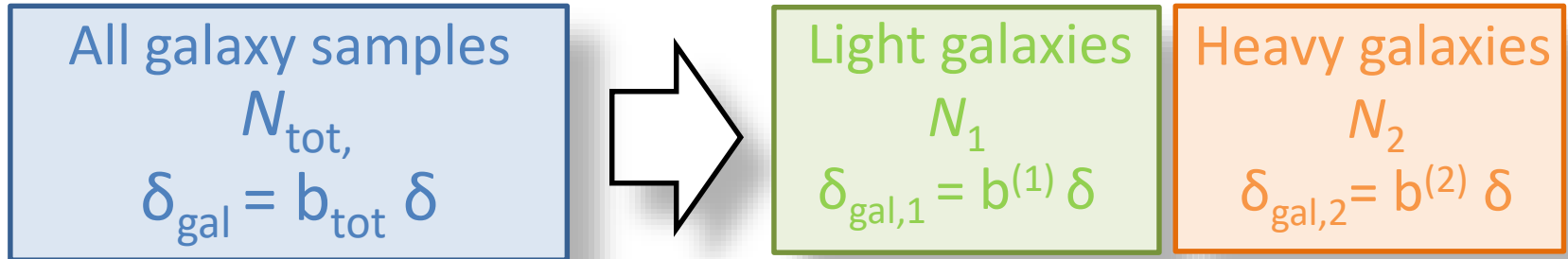
ノイズをゼロにする極限でも決定精度は有限に留まる



コズミックバリエーション

: 宇宙が単一であることから独立モードの有限性

マルチトレーサー法

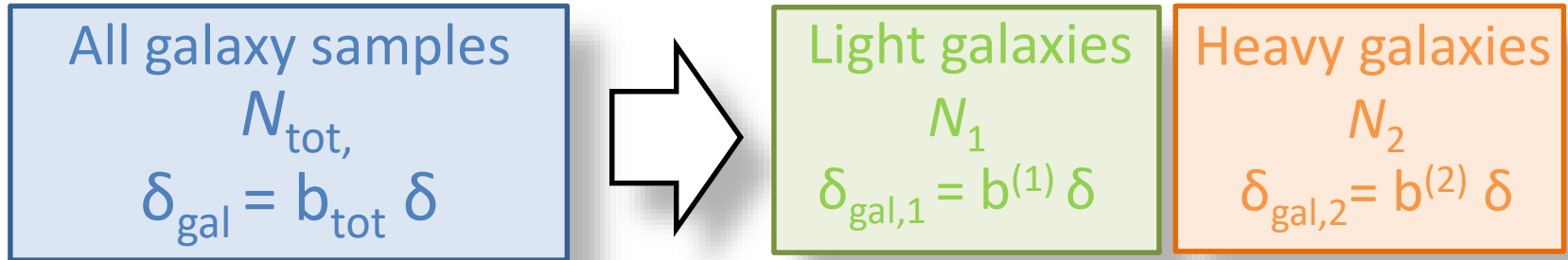


Q: コズミックバリエーションノイズは排除可能か？

サンプルをサブサンプルに分割すると排除できる
場合がある！

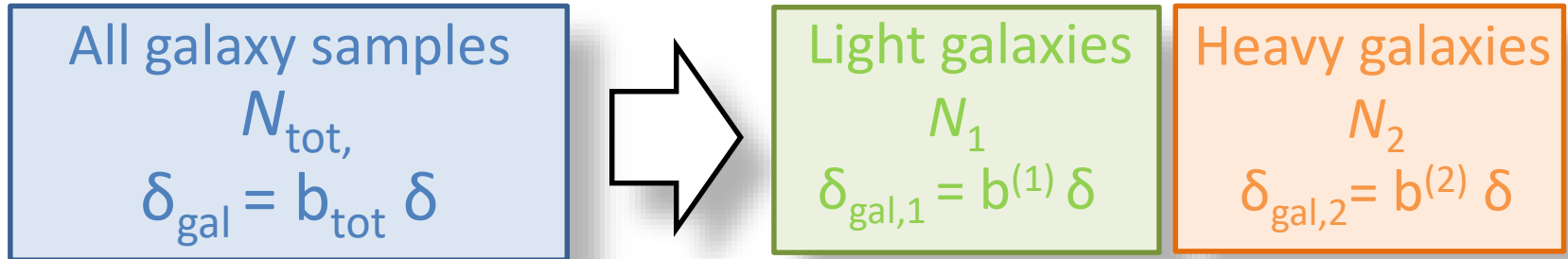
= マルチトレーサー法

マルチトレーサー法



$$\sigma(\theta) = (F_{\theta\theta})^{-1/2} = (d\mathbf{P}/d\theta \cdot \text{Cov}[\mathbf{P}, \mathbf{P}]^{-1} \cdot d\mathbf{P}/d\theta)^{-1/2}$$

マルチトレーサー法

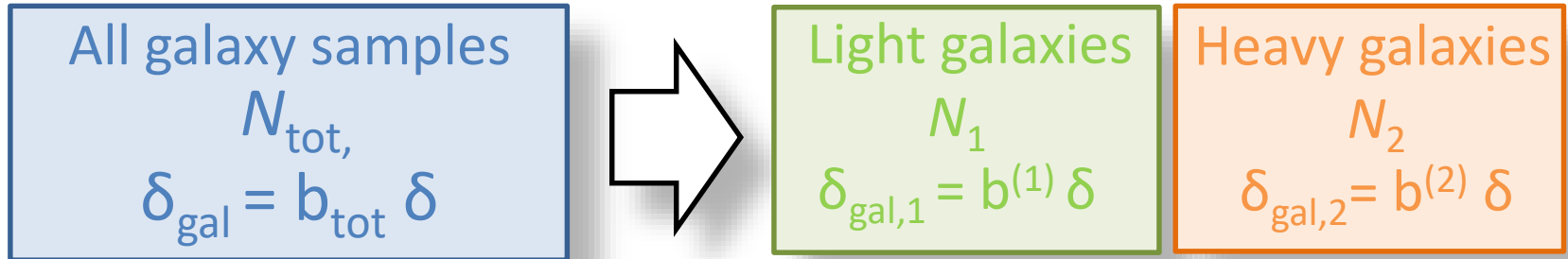


$$\mathbf{P} = \{ P^{(11)}, P^{(12)}, P^{(22)} \} = \{ \alpha^2 P_2, r\alpha P_2, P_2 \}$$

$$\sigma(\theta) = (F_{\theta\theta})^{-1/2} = (d\mathbf{P}/d\theta \cdot \text{Cov}[\mathbf{P}, \mathbf{P}]^{-1} \cdot d\mathbf{P}/d\theta)^{-1/2}$$

$$\text{Cov} = \begin{pmatrix} (\alpha^2 P_2 + N_1^{-1})^2 & (\alpha^2 P_2 + N_1^{-1}) r \alpha P_2 & r^2 \alpha^2 P_2^2 \\ * & ((\alpha^2 P_2 + N_1^{-1})(P_2 + N_2^{-1}) + r^2 \alpha^2 P_2^2) / 2 & (P_2 + N_2^{-1}) r \alpha P_2 \\ * & * & (P_2 + N_2^{-1})^2 \end{pmatrix}$$

マルチトレーサー法



$$\mathbf{P} = \{ P^{(11)}, P^{(12)}, P^{(22)} \} = \{ \alpha^2 P_2, r\alpha P_2, P_2 \}$$

$$\sigma(\alpha) = (F_{\alpha\alpha})^{-1/2} = (d\mathbf{P}/d\alpha \cdot \text{Cov}[\mathbf{P}, \mathbf{P}]^{-1} \cdot d\mathbf{P}/d\alpha)^{-1/2}$$

$$\sigma(\alpha = b_1^{(1)}/b_1^{(2)}) \rightarrow ((P_2 N_1)^{-1} + \alpha^2 (P_2 N_2)^{-1})^{1/2}$$

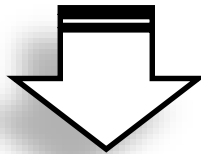
ノイズを小さくすればただで決定精度が上がる！

$$\sigma(\ln P) \rightarrow 1 + O(1/P N_{\text{tot}})$$

銀河バイスペクトルへの応用

➤ 簡便のため、正三角形型のみ考える

$$B^{(abc)}(k, k, k) = (b_1^{(a)} b_1^{(b)} b_{2, \text{eff}}^{(c)} + (\text{perm})) P_L^2(k)$$



f_{NL} の寄与が含まれる

$$\sigma(\theta) = (F_{\theta\theta})^{-1/2} = (d\mathbf{B}/d\theta \cdot \text{Cov}[\mathbf{B}, \mathbf{B}]^{-1} \cdot d\mathbf{B}/d\theta)^{-1/2}$$

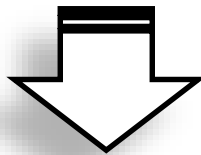
$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \{ B^{(111)}, B^{(112)}, B^{(122)}, B^{(222)} \} \\ &= \{ \alpha^2 \gamma B_2, (\alpha^2 + 2\alpha\gamma) B_2 / 3, (2\alpha + \gamma) B_2 / 3, B_2 \} \end{aligned}$$

- $\text{Cov}[\mathbf{B}, \mathbf{B}]$ は複雑になるが α, γ, r, P_2 で書くことができる

銀河バイスペクトルへの応用

➤ 簡便のため、正三角形型のみ考える

$$B^{(abc)}(k,k,k) = (b_1^{(a)} b_1^{(b)} b_{2,\text{eff}}^{(c)} + (\text{perm})) P_L^2(k)$$



f_{NL} の寄与が含まれる

$$\sigma(\boldsymbol{y}) = (F_{\boldsymbol{y}\boldsymbol{y}})^{-1/2} = (d\boldsymbol{B}/d\boldsymbol{y} \cdot \text{Cov}[\boldsymbol{B}, \boldsymbol{B}]^{-1} \cdot d\boldsymbol{B}/d\boldsymbol{y})^{-1/2}$$

$$\sigma(y = b_{2,\text{eff}}^{(1)}/b_{2,\text{eff}}^{(2)})$$

$$\rightarrow (3P_2^3/B_2^2)^{1/2} ((P_2 N_1)^{-1} + \alpha^2 (P_2 N_2)^{-1})^{1/2}$$

銀河バイスペクトルについてもマルチトレーサー法を使うとノイズを小さくすればただで決定精度が上がることを示すことが出来た！

局所型・非局所型非ガウス性

➤ 局所型

$$B_{\Phi}^{\text{local}}(k_1, k_2, k_3) = 2 f_{\text{NL}} (P_{\Phi}(k_1)P_{\Phi}(k_2) + \text{cyc})$$

➤ 非局所型

 銀河パワースペクトル解析で検出可能

• 正三角形型

$$B_{\Phi}^{\text{eq}}(k_1, k_2, k_3) = 6 f_{\text{NL}} [- (P_{\Phi}(k_1)P_{\Phi}(k_2) + \text{cyc}) \\ - 2 (P_{\Phi}(k_1)P_{\Phi}(k_2)P_{\Phi}(k_3))^{2/3} \\ + (P_{\Phi}^{1/3}(k_1)P_{\Phi}^{2/3}(k_2)P_{\Phi}(k_3) + 5\text{perm})]$$

• 直交型

$$B_{\Phi}^{\text{orth}}(k_1, k_2, k_3) = 6 f_{\text{NL}} [-3(P_{\Phi}(k_1)P_{\Phi}(k_2) + \text{cyc}) \\ - 8 (P_{\Phi}(k_1)P_{\Phi}(k_2)P_{\Phi}(k_3))^{2/3} \\ + 3 (P_{\Phi}^{1/3}(k_1)P_{\Phi}^{2/3}(k_2)P_{\Phi}(k_3) + 5\text{perm})]$$

?

非局所型fNLは銀河サーベイでは 決まらないのか？

$$f_{\text{NL}}^{\text{loc}} \rightarrow \Delta b[f_{\text{NL}}^{\text{loc}}] \propto 1/k^2$$

$$g_{\text{NL}}^{\text{loc}} \rightarrow \Delta b[g_{\text{NL}}^{\text{loc}}] \propto 1/k^2$$

$$\tau_{\text{NL}}^{\text{loc}} \rightarrow \Delta b[\tau_{\text{NL}}^{\text{loc}}] \propto 1/k^4$$

強い依存性

⇒ 銀河パワースペクトル
解析で検出可能

$$f_{\text{NL}}^{\text{eq}} \rightarrow \Delta b[f_{\text{NL}}^{\text{eq}}] \propto 1/k^0$$

$$f_{\text{NL}}^{\text{fol}} \rightarrow \Delta b[f_{\text{NL}}^{\text{fol}}] \propto 1/k^1$$

$$f_{\text{NL}}^{\text{orth}} \rightarrow \Delta b[f_{\text{NL}}^{\text{orth}}] \propto 1/k^1$$

弱い依存性

⇒ 銀河バイスペクトル
解析で検出可能(?)

複数トレーサー用赤方偏移変形

- 銀河の動径方向速度による変形 → 赤方偏移変形
- 計算の簡便さのため、ゼロモードのみ使いたい
- パワースペクトルの場合

$$P_s^{(a)(b)} = b_1^{(a)} b_1^{(b)} P_L(k) \\ \rightarrow (b_1^{(a)} + f\mu_1^2) (b_1^{(b)} + f\mu_2^2) P_L(k)$$



Legendre展開

$$P_{s,l=0}^{(a)(b)} = (b_1^{(a)} b_1^{(b)} + (b_1^{(a)} + b_1^{(b)}) f/3 + f^2/5) P_L(k)$$

複数トレーサー用赤方偏移変形

- バイスpekトル(非線形重力進化)の場合

$$B_{s,\text{grav}}^{(a)(b)(c)} = (1/6)[(b_1^{(a)} + f\mu_1^2)(b_1^{(b)} + f\mu_2^2) \\ (b_2^{(c)} + 2b_1^{(c)} F_2(k_1, k_2)) + (\text{perm})] P_L(k_1) P(k_2) + \text{cyc.}$$

非線形バイアス 非線形進化



k_1, k_2, k_3 に対して平均化
= ゼロモード

$$B_{s,\text{grav}}^{(a)(b)(c)} = (1/6)[(b_1^{(a)} + f/3)(b_1^{(b)} + f/3) \\ (b_2^{(c)} + 2b_1^{(c)} F_2(k_1, k_2)) + (\text{perm})] P_L(k_1) P(k_2) + \text{cyc.}$$

複数トレーサー用赤方偏移変形

- バイスpekトル(非線形重力進化)の場合

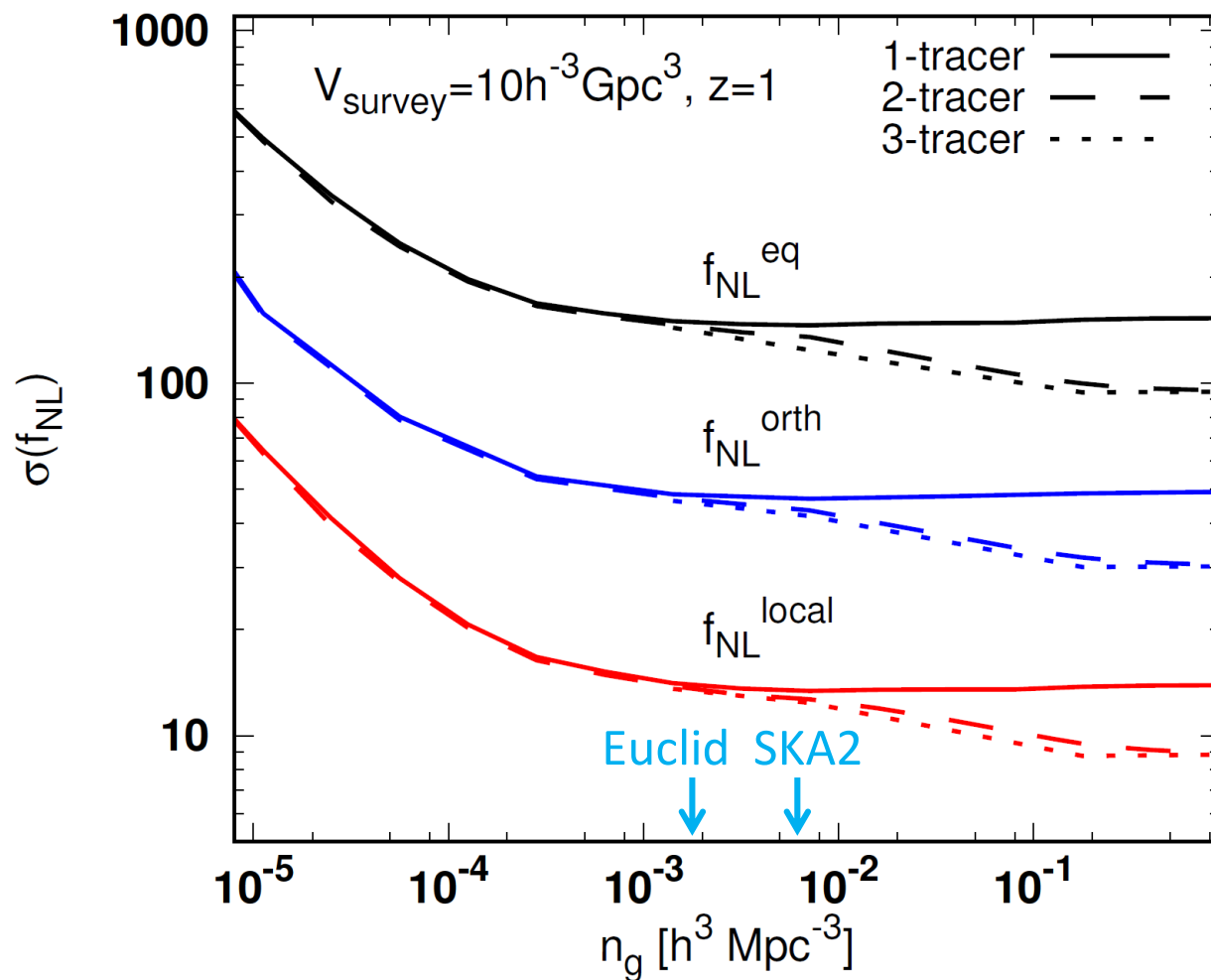
$$B_{s,bi}^{(a)(b)(c)} = (1/6)[(b_1^{(a)} + f\mu_1^2)(b_1^{(b)} + f\mu_2^2)(b_1^{(c)} + f\mu_3^2) + (\text{perm})] B_L(k_1, k_2, k_3)$$



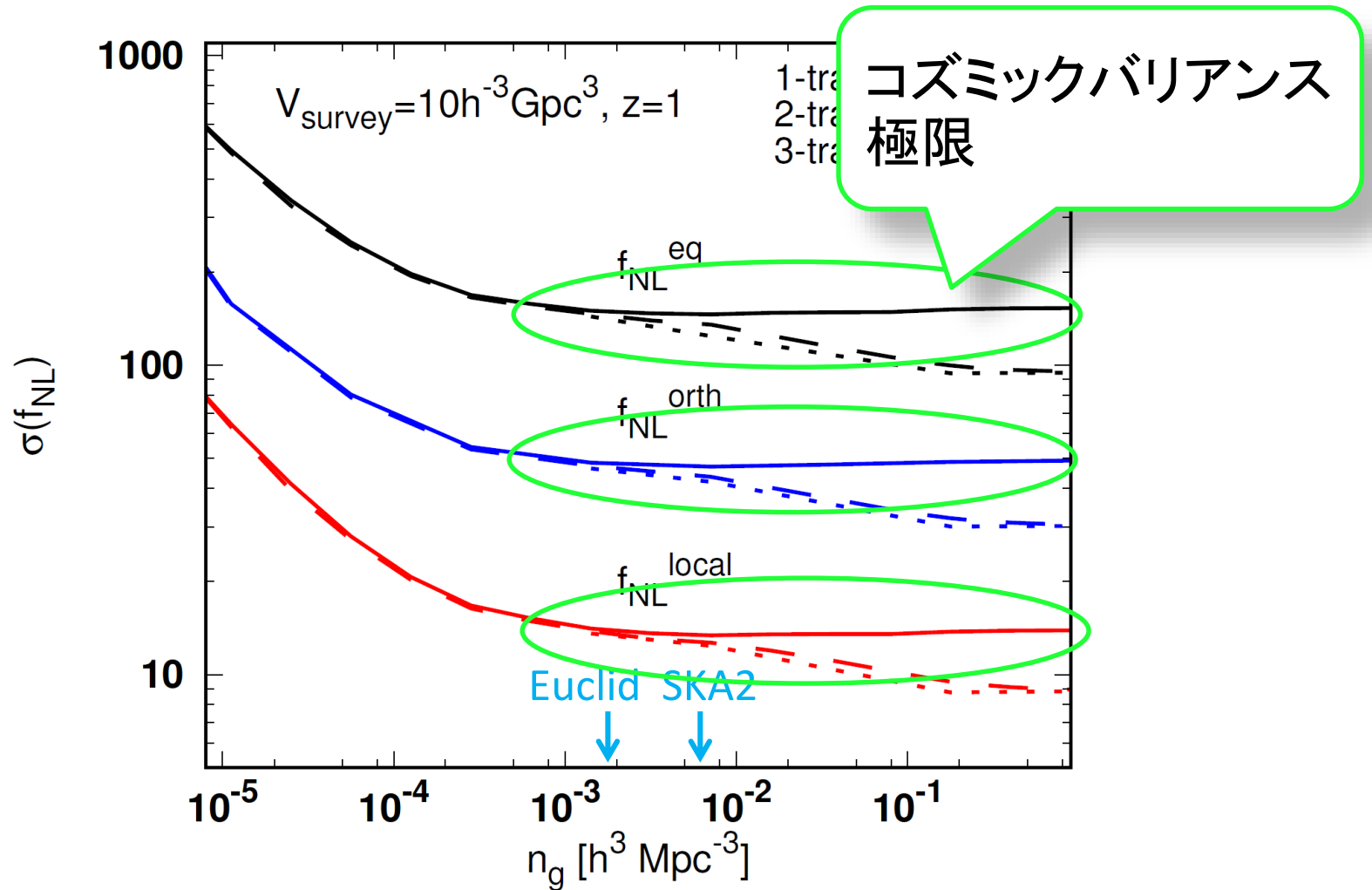
k_1, k_2, k_3 に対して平均化
= ゼロモード

$$B_{s,bi}^{(a)(b)(c)} = (1/6)[(b_1^{(a)} + f/3)(b_1^{(b)} + f/3)b_1^{(c)} + (\text{perm})] B_L(k_1, k_2, k_3)$$

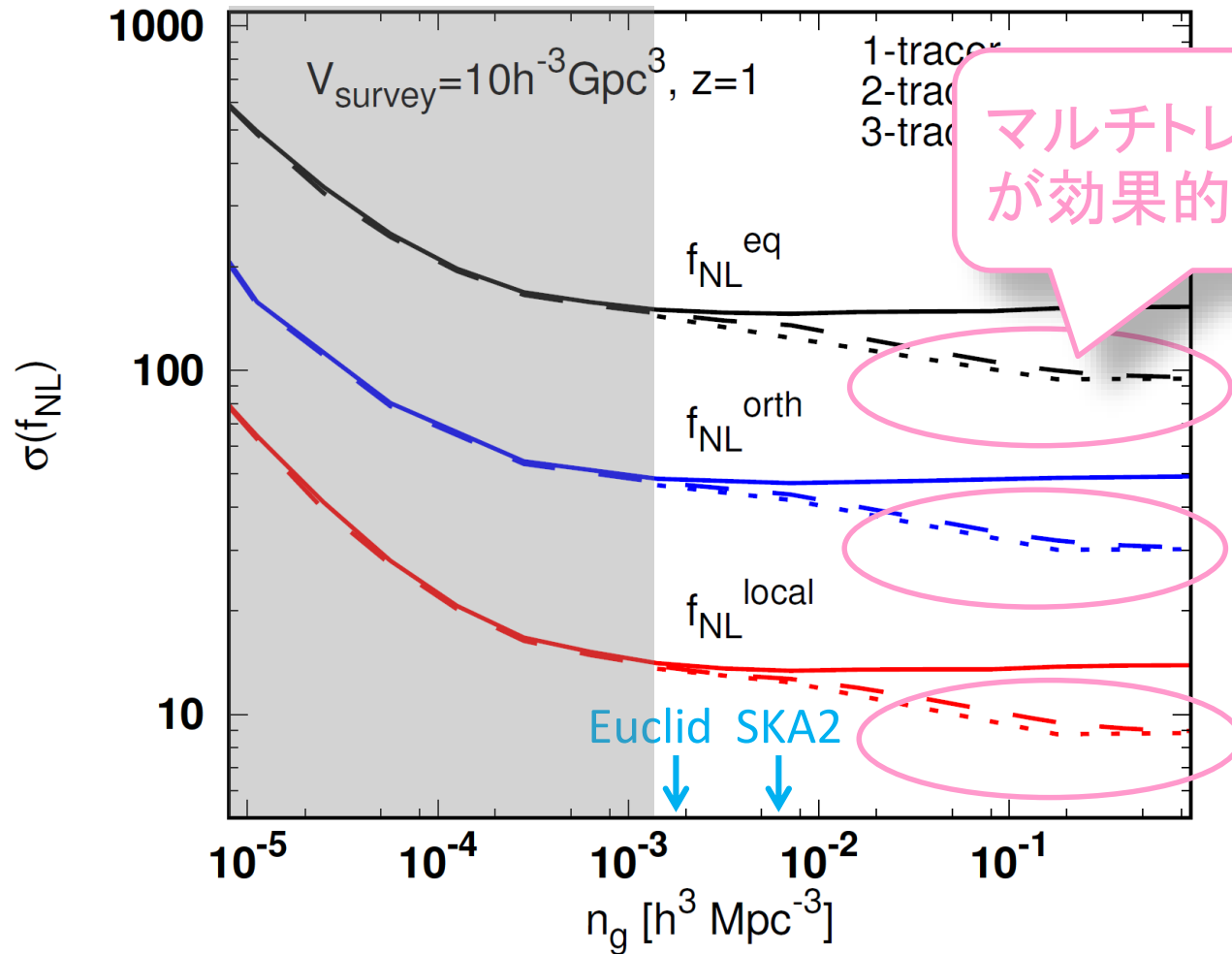
決定精度：銀河数密度依存性



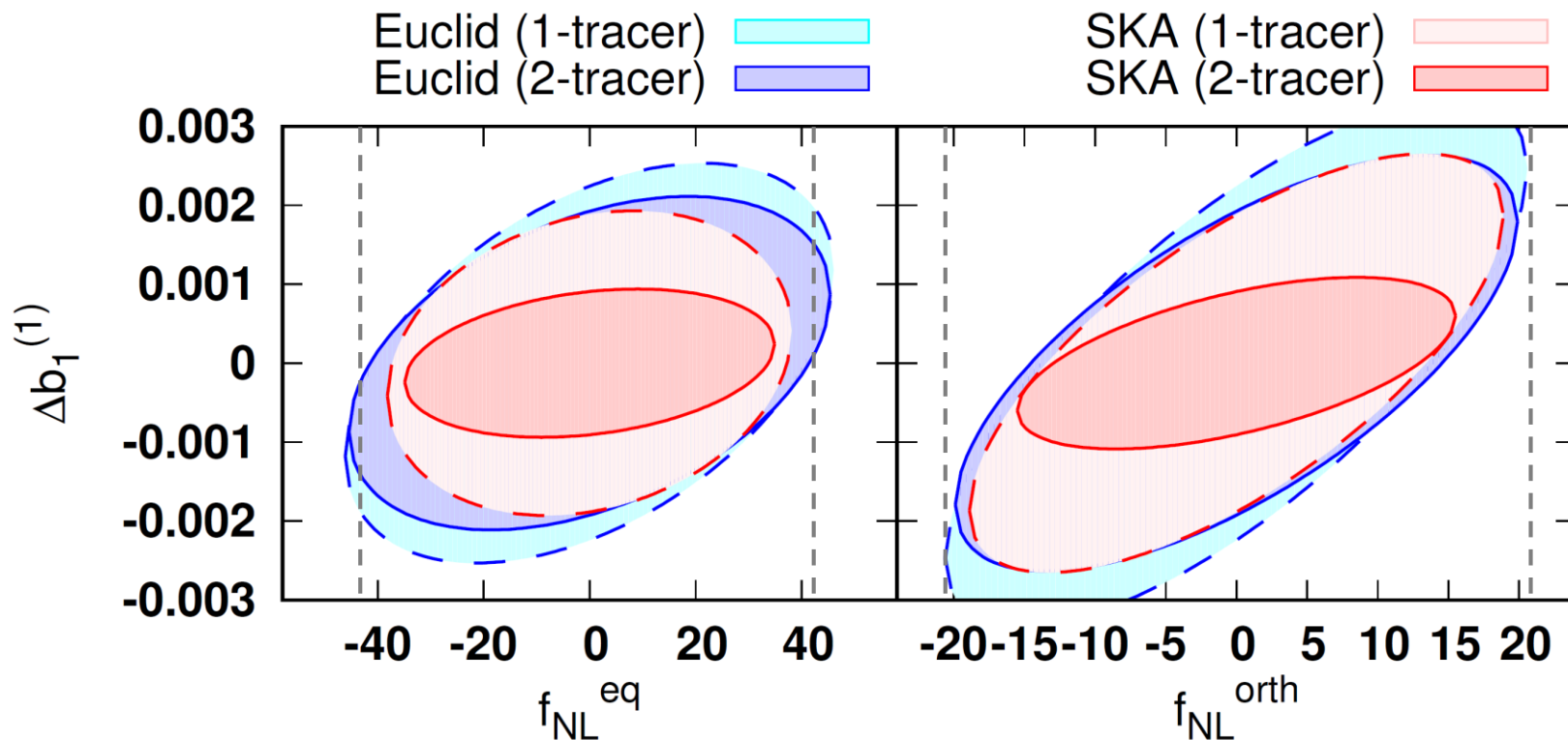
決定精度：銀河数密度依存性



決定精度：銀河数密度依存性



将来の銀河サーベイ



	1-tracer	2-tracer
Planck	(43)	(43)
Euclid	30.4	30.0
SKA2	25.1	23.0

	1-tracer	2-tracer
Planck	(21)	(21)
Euclid	13.6	13.1
SKA2	12.4	10.2

まとめ

- ① マルチトレーサー法は銀河バイスペクトルでも効果的
- ② 複数トレーサーの場合の赤方偏移変形(monopole)
- ③ コズミックバリエーションを超えて、局所型でない非線形パラメータ ($f_{\text{NL}}^{\text{eq}}$, $f_{\text{NL}}^{\text{orth}}$) が決定できる

	eq	orth
Planck	43	21
Euclid	30.0	13.1
SKA2	23.0	10.2