

Multitracer technique for galaxy bispectrum

共同研究者: 横山修一郎(立教大), 高橋慶太郎(熊本大),
高橋智(佐賀大)

山内 大介

神奈川大学 工学部 物理学教室

宇宙論研究の現状

とにかく原始揺らぎのことが知りたい！

観測済み

- 原始曲率揺らぎ → スケール不変からのわずからのズレ(5 σ)

$$P_{\Phi}(k) \propto k^{-0.04} \quad [\text{WMAP, Planck, ...}]$$

観測近し

- 原始重力波 → 原始曲率揺らぎの10%以下 [Planck]

[future : LiteBIRD, COrE+, PIXIE, ...]

最後の
ピース

- 原始揺らぎの統計性 → 「ほぼ」ガウス分布 [Planck]

✓ ガウス分布からのズレをパラメータ化

: 非線形パラメータ f_{NL} [Komatsu+Spergel (2001)]

原始バイスペクトル(3点関数)いろいろ

➤ 局所型: 非線形相互作用に敏感

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

➤ “非”局所型

• 正三角形型: 音速に敏感

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

• 直交型: 真空の取り方に敏感

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

A Key Science with SKA1 and SKA2

➤ List of highest priority SKA1 science

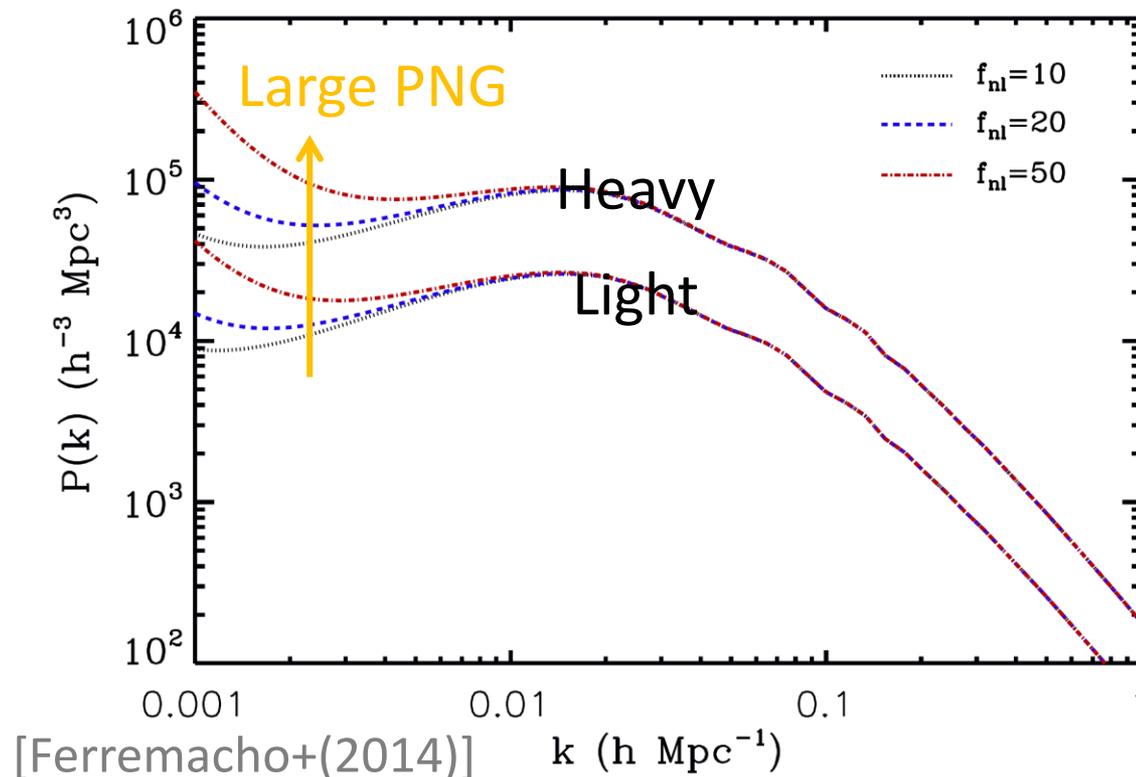
Science Goal	SWG	Objective	SWG Rank
1	<i>CD/EoR</i>	Physics of the early universe IGM - I. Imaging	1/3
2	<i>CD/EoR</i>	Physics of the early universe IGM - II. Power spectrum	2/3
4	<i>Pulsars</i>	Reveal pulsar population and MSPs for gravity tests and Gravitational Wave detection	1/3
5	<i>Pulsars</i>	High precision timing for testing gravity and GW detection	1/3
13	<i>HI</i>	Resolved HI kinematics and morphology of $\sim 10^{10} M_{\odot}$ mass galaxies out to $z \sim 0.8$	1/5
14	<i>HI</i>	High spatial resolution studies of the ISM in the nearby Universe.	2/5
15	<i>HI</i>	Multi-resolution mapping studies of the ISM in our Galaxy	3/5
18	<i>Transients</i>	Solve missing baryon problem at $z \sim 2$ and determine the Dark Energy Equation of State	=1/4
22	<i>Cradle of Life</i>	Map dust grain growth in the terrestrial planet forming zones at a distance of 100 pc	1/5
27	<i>Magnetism</i>	The resolved all-Sky characterisation of the interstellar and intergalactic magnetic fields	1/5
32	<i>Cosmology</i>	Constraints on primordial non-Gaussianity and tests of gravity on super-horizon scales.	1/5
33	<i>Cosmology</i>	Angular correlation functions to probe non-Gaussianity and the matter dipole	2/5
37 + 38	<i>Continuum</i>	Star formation history of the Universe (SFHU) – I+II. Non-thermal & Thermal processes	1+2/8

“Constraints on primordial non-Gaussianity and tests of gravity on super-horizon scales”

銀河を数えて原始非ガウス性を探そう

- ▶ 原始非ガウス性があると、銀河バイアスにスケール依存性が生まれる

$$P_{\text{gal}} = [b_1(M, z) + f_{\text{NL}} \beta_f(M, z) / k^2 D_+(z)]^2 P_\delta$$



<i>Observables</i>	<i>Surveys</i>	<i>SKA Phase</i>	<i>Redshifts</i>	<i>Coverage (deg²)</i>	<i>Galaxy number</i>
<i>HI 21cm line</i>	<i>HI galaxy redshift survey</i>	Phase-1	$z < 0.8$	5,000	$\sim 10^7$
		Phase-2	$z < 2$	30,000	$\sim 10^9$
<i>HI 21cm line</i>	<i>HI intensity mapping</i>	Phase-1	$z < 3$	30,000	--
		Phase-2	$z < 3.7$	30,000	--
<i>synchrotron rad.</i>	<i>Radio continuum</i>	Phase-1	$z < 6$	30,000	$\sim 10^8$
		Phase-2	$z < 6$	30,000	$\sim 10^9$
<i>synchrotron rad.</i>	<i>Weak lensing</i>	Phase-1	$z < 3$	5,000	3 [arcmin ⁻²]
		Phase-2	$z < 6$	30,000	10 [arcmin ⁻²]
<i>optical/IR</i>	<i>e.g. Euclid</i>		$z < 2$	15,000	$\sim 10^8$

$S = 70(\text{SKA1gal}), 5(\text{SKA2gal}), 1(\text{SKA1cont}), 0.1(\text{SKA2cont}) [\mu\text{Jy}]$
 $\Delta\theta = 1(\text{SKA1}), 0.1(\text{SKA2}) [\text{arcsec}], t_{\text{int}} = 10^4 [\text{hr}]$

サンプルバリエーション

➤ パラメータ θ の決定精度

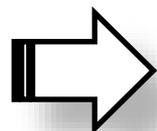
$$\sigma(\theta) = (F_{\theta\theta})^{-1/2} = (d\mathbf{P}/d\theta \cdot \text{Cov}[\mathbf{P}, \mathbf{P}]^{-1} \cdot d\mathbf{P}/d\theta)^{-1/2}$$



➤ 単一レーザ解析: 振幅の決定精度

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

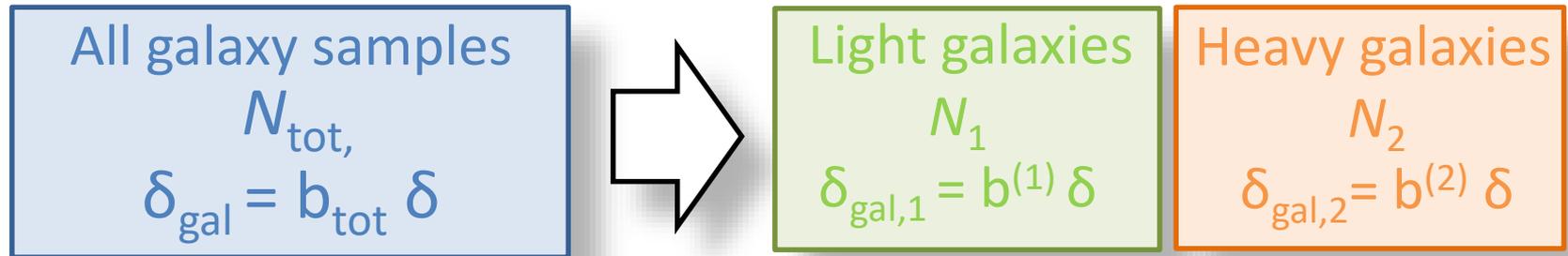
ノイズをゼロにする極限でも決定精度は有限に留まる



サンプルバリエーション

: 独立モードの有限性によるノイズ

マルチトレーサー法

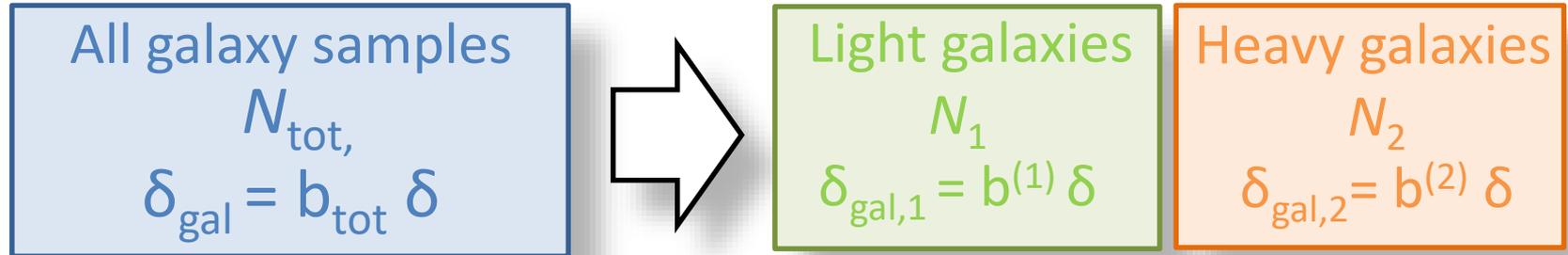


Q: サンプルバリエーションノイズは排除不能か？

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！

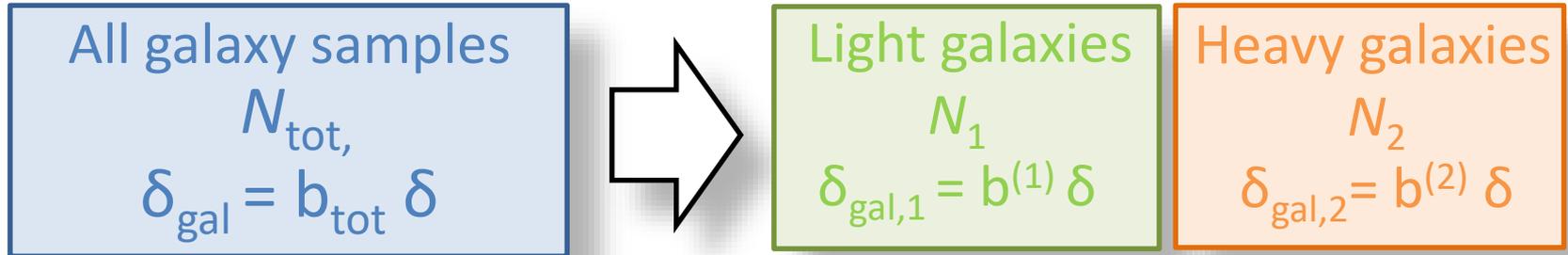
= マルチトレーサー法

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

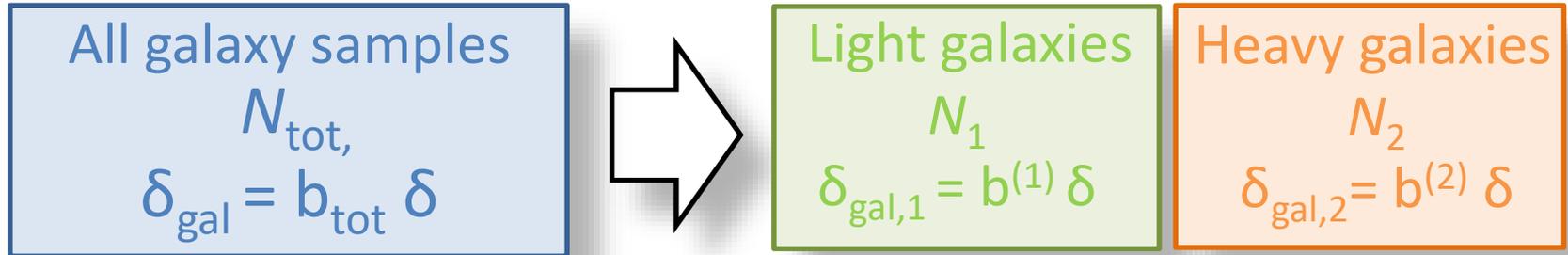


$$\mathbf{P} = \{ P^{(11)}, P^{(12)}, P^{(22)} \} = \{ \alpha^2 P_2, r\alpha P_2, P_2 \}$$

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

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

マルチトレーサー法



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

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

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

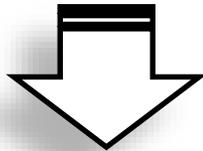
ノイズを小さくすればただで決定精度が上がる！

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

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

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

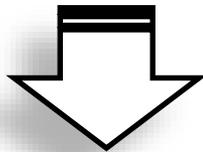
$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \{ B^{(111)}, B^{(112)}, B^{(122)}, B^{(222)} \} \\ &= \{ \alpha^2 \gamma B_2, (\alpha^2 + 2\alpha\gamma) B_2 / 3, (2\alpha + \gamma) B_2 / 3, B_2 \} \end{aligned}$$

- $\text{Cov}[\mathbf{B},\mathbf{B}]$ 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！

非局所型 f_{NL} は銀河サーベイでは 決まらないのか？

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

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

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

強い依存性

⇒ 銀河パワースペクトル
解析で検出可能

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

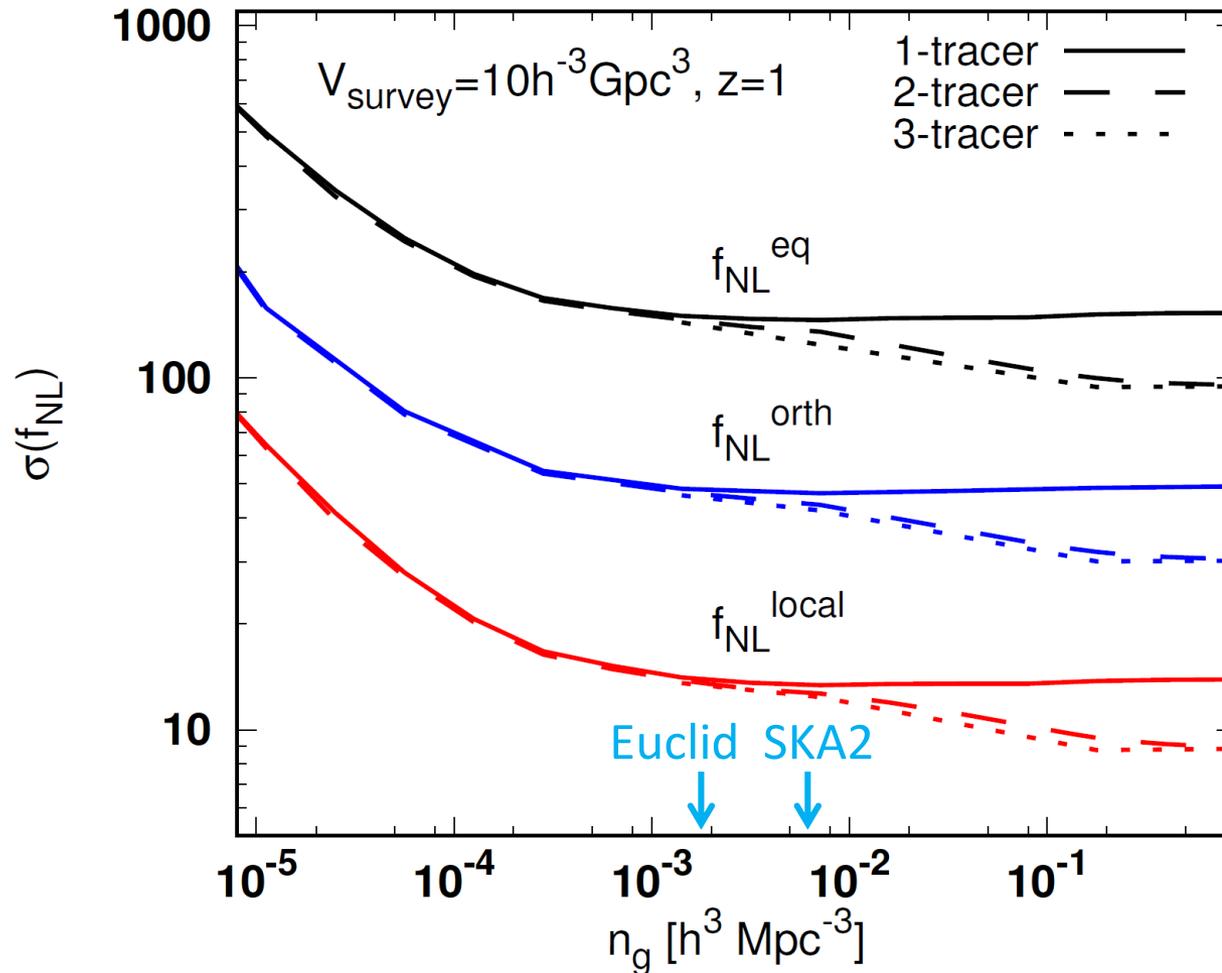
$$f_{NL}^{fol} \rightarrow \Delta b[f_{NL}^{fol}] \propto 1/k^1$$

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

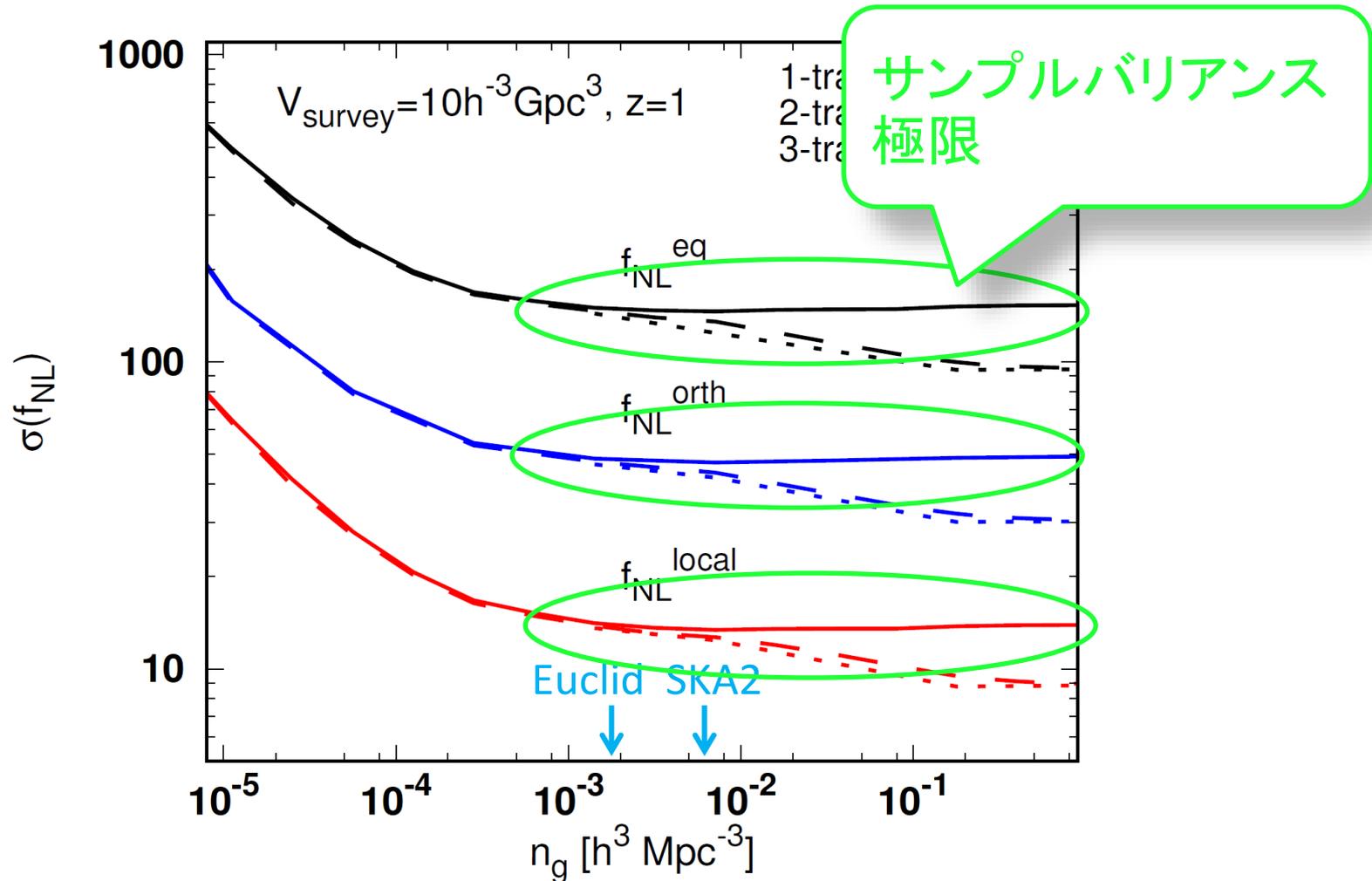
弱い依存性

⇒ 銀河バイスペクトル
解析で検出可能！

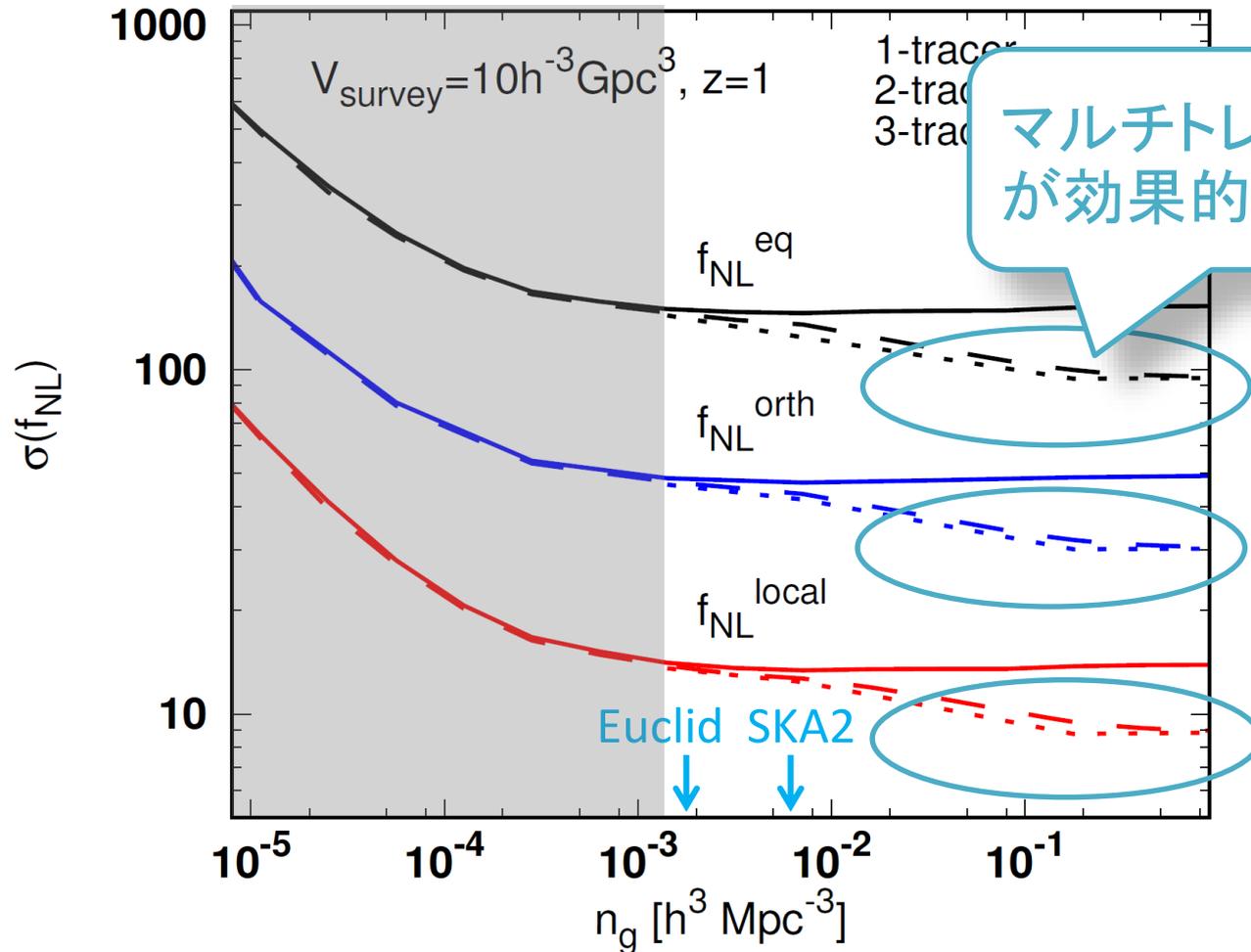
決定精度：銀河数密度依存性



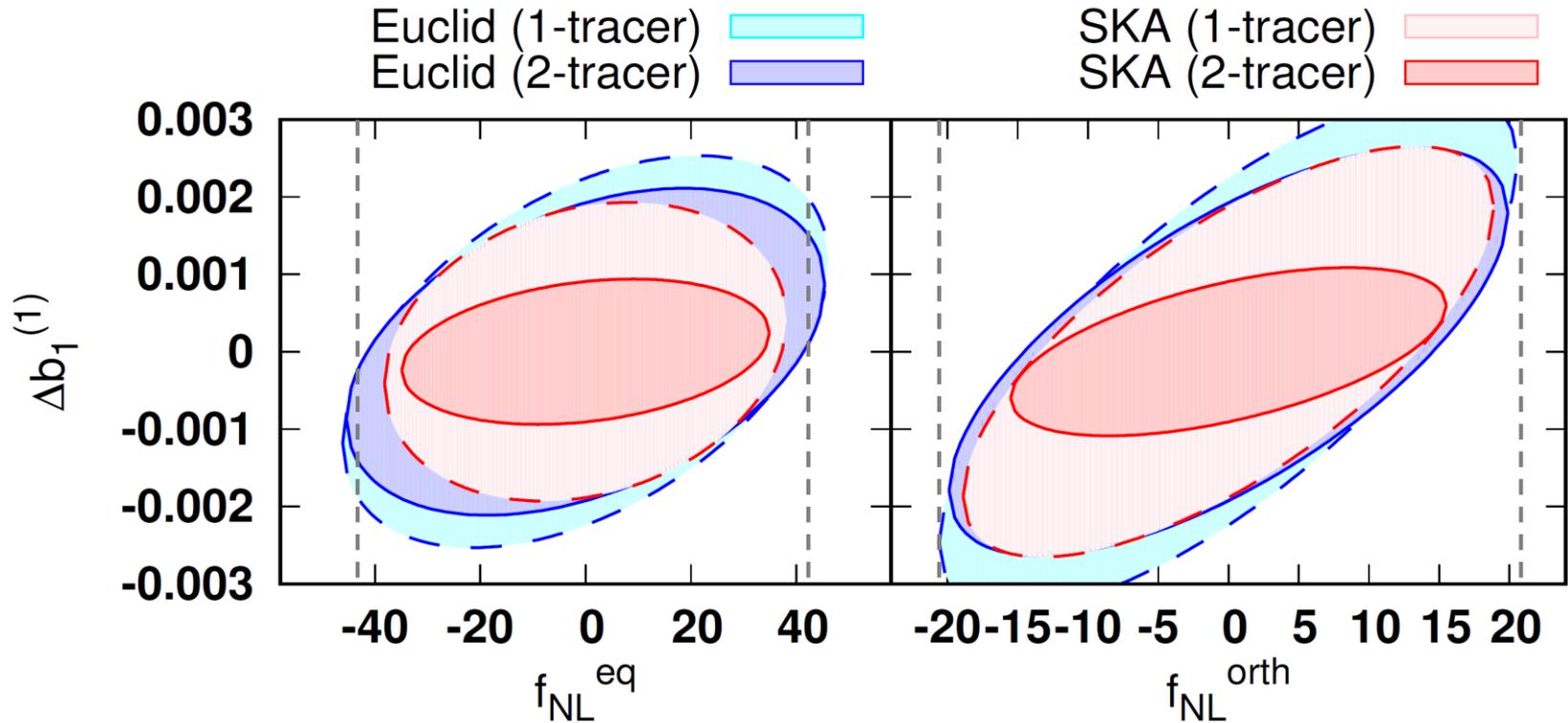
決定精度：銀河数密度依存性



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

揺らぎの生成機構の詳細に迫る

- 一般化された局所型バイスペクトル [Shandere+Dalal+Huterer (2011)]

$$B_{\Phi}(k_1, k_2, k_3) = 2 f_{\text{NL}}^{\text{eff}} [\xi_s(k_3) \xi_m(k_1) \xi_m(k_2) P_{\Phi}(k_1) P_{\Phi}(k_2) + \text{cyc.}]$$

$$\text{with } \xi_{s,m}(k) = (k/k_{\text{piv}})^{n_{f\text{NL}}^{(s,m)}}$$

- ✓ 原始バイスペクトルが非自明なスケール依存性を持つ！

⇒ 揺らぎ生成モデル(カーバトン等)に強く依存！

- ✓ スケール依存するバイアスも誘起

[Matsubara(2012), Desjacques+Jeong+Schmidt(2011), Shandere+Dalal+Huterer (2011)]



パワー/バイスペクトルを組み合わせた解析

揺らぎの生成機構の詳細に迫る

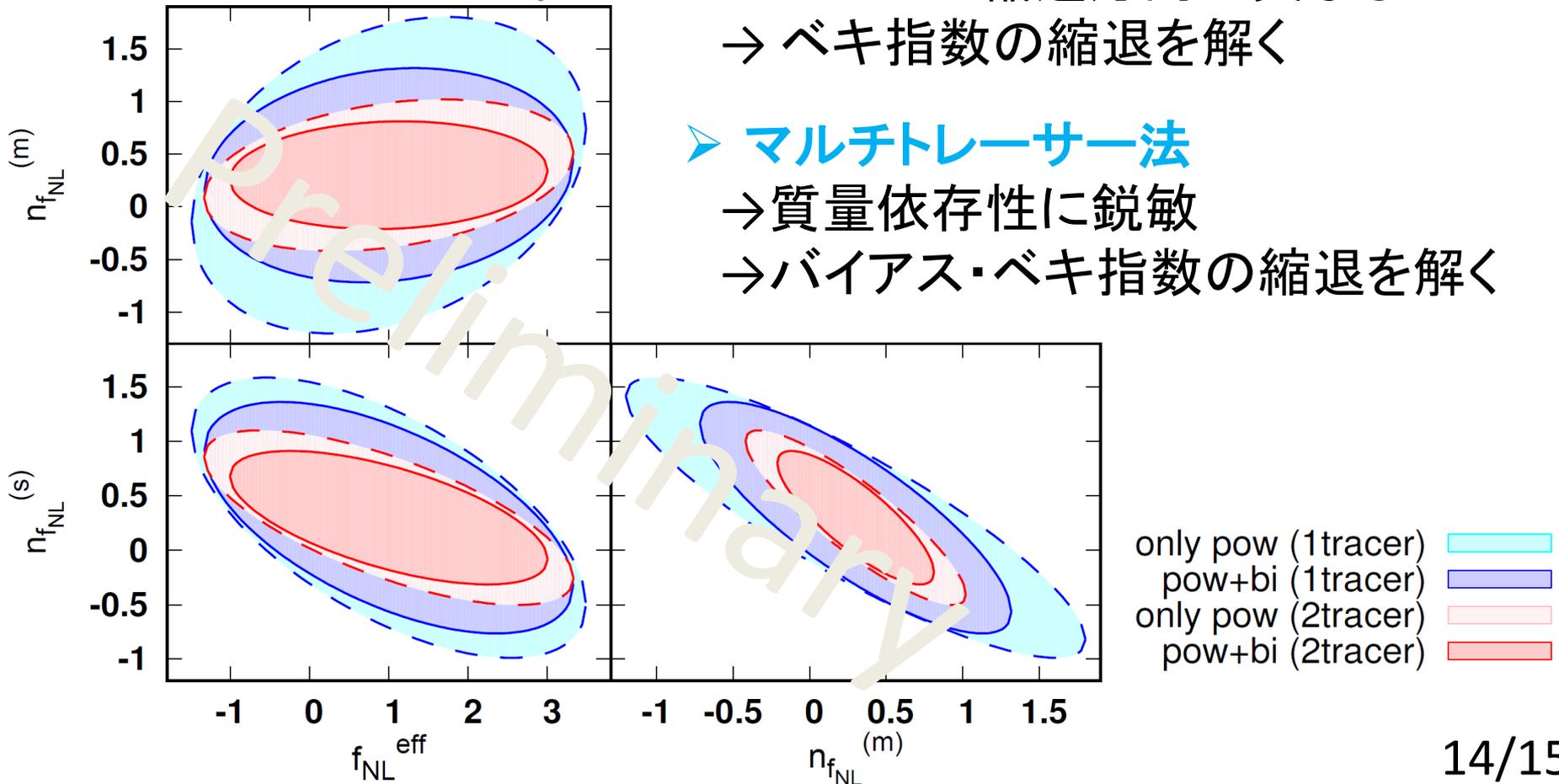
▶ バイスペクトル解析

- パワーと縮退方向が異なる
- ベキ指数の縮退を解く

▶ マルチトレーサー法

- 質量依存性に鋭敏
- バイアス・ベキ指数の縮退を解く

SKA2-like survey



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 サンプル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

[DY, S.Yokoyama, K.Takahashi, 1611.03590]

- ③ スケール依存する原始非ガウス性への拡張
→ カーバトンモデルの峻別

[DY, S.Yokoyama, T.Takahashi, work in progress]