

Constraining scale-dependent primordial non-Gaussianities from galaxy power and bispectrum

共同研究者：横山修一郎(名古屋), 高橋智(佐賀)

山内大介

神奈川大学

工学部物理学教室

Take-Home Message

- 局所型原始非ガウス性(f_{NL} , τ_{NL} , g_{NL} タイプ)の スケール依存性をslow-rollパラメータの1次精度で求めた
- スケール依存性をパラメータ化した局所型非ガウス性を提案
- 銀河パワースペクトル/バイスペクトルへの局所型原始非ガウス性のスケール依存性の影響を同定

原始非ガウス性はスケール依存性を持つ？

□ ポイント：

$$B_{\zeta}(k_1, k_2, k_3) = \frac{6}{5} f_{\text{NL}} P_{\zeta}(k_1) P_{\zeta}(k_2) + (\text{perms})$$

◆ スカラー場のslow-rollの最低次で妥当

→ $O(\varepsilon)$ のスケール依存性は存在

◆ 超ホライズンでの振る舞いでk依存性を持つ

→ どの k_i に依存するかを明白に

Warm-up : 単一スカラー場

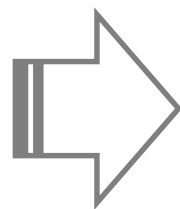
□ 超ホライズンスカラー場揺らぎ

$$\delta\phi(t, \mathbf{k}) \approx \frac{H(t)}{\sqrt{2k^3}} \left(\frac{k}{a(t)H(t)} \right)^{\eta-3\epsilon}$$

□ Horizon-crossing time $t_*(k)$

$$a(t_*(k))H(t_*(k)) = k$$

スケール依存性



$$\delta\phi(t_*(k), \mathbf{k}) \approx \frac{H(t_*(k))}{\sqrt{2k^3}}$$

Warm-up : 単一スカラー場

□ 曲率揺らぎとの関係

□ Comoving slice @ t_f

□ ζ は t_i には依存しない

$$\zeta(t_f, \mathbf{k}) \approx N_\phi(t_f, t_i) \delta\phi(t_i, \mathbf{k}) + \dots$$

□ 曲率揺らぎパワースペクトル

スケール依存性

$$P_\zeta(t_f, k) \approx N_\phi^2(t_f, t_*(k)) \frac{H^2(t_*(k))}{2k^3}$$

(注意) 2つの t_i を揃える必要は一般にはない。

バイスペクトルのスケール依存性

□ バイスペクトル = 非同時刻相関 × 2

$$\langle \zeta(\mathbf{k}_1)\zeta(\mathbf{k}_2)\zeta(\mathbf{k}_3) \rangle = \frac{1}{2} N_\phi(t_*(k_1))N_\phi(t_*(k_2))N_{\phi\phi}(t_*(k_3))$$
$$\times \int \frac{d^3\mathbf{q}}{(2\pi)^3} \langle \delta\phi(t_*(k_1), \mathbf{k}_1)\delta\phi(t_*(k_2), \mathbf{k}_2)\delta\phi(t_*(k_3), \mathbf{k}_3 - \mathbf{q})\delta\phi(t_*(k_3), \mathbf{q}) \rangle + \dots$$

非同時刻相関

非同時刻相関

□ 非同時刻相関 = 同時刻相関 × スケール依存性

$$\langle \delta\phi(t_*(k), \mathbf{k})\delta\phi(t_*(q), \mathbf{k}') \rangle = \left(\frac{q}{k}\right)^{2\epsilon-\eta} \langle \delta\phi(t_*(k), \mathbf{k})\delta\phi(t_*(k), \mathbf{k}') \rangle$$

$$\delta\phi(t, \mathbf{k}) \approx \frac{H(t)}{\sqrt{2k^3}} \left(\frac{k}{a(t)H(t)}\right)^{\eta-3\epsilon}$$

バイスペクトルのスケール依存性

□ 単一スカラー場による一般的なバイスペクトル

$$B_{\zeta}(k_1, k_2, k_3) \quad [\text{Byrnes+Nurmi+Tasinato+Wands(2010)}]$$
$$= \frac{N_{\phi\phi}(t_*(k_3))}{N_{\phi}(t_*(k_1))N_{\phi}(t_*(k_2))} \left(\frac{k_1 k_2}{k_3^2}\right)^{-2\epsilon+\eta} P_{\zeta}(k_1)P_{\zeta}(k_2)$$

$$= \frac{N_{\phi\phi}(k_{\text{piv}})}{N_{\phi}^2(k_{\text{piv}})} \left(\frac{k_1}{k_{\text{piv}}}\frac{k_2}{k_{\text{piv}}}\right)^{-2\epsilon+\eta-n_{\phi}} \left(\frac{k_3}{k_{\text{piv}}}\right)^{2(2\epsilon-\eta)+n_{\phi\phi}} P_{\zeta}(k_1)P_{\zeta}(k_2)$$

通常(5/6) f_{NL} とするところ

スケール依存性

$$[N_{\phi} \propto k^{n_{\phi}}, N_{\phi\phi} \propto k^{n_{\phi\phi}}]$$

トリスpekトルのスケール依存性

□ 単一スカラー場による一般的なトリスpekトル

[DY+S.Yokoyama+T.Takahashi, in prep]

$$T_\zeta(k_1, k_2, k_3, k_4) =$$

$$\frac{N_{\phi\phi}(t_*(k_3))N_{\phi\phi}(t_*(k_4))}{N_\phi(t_*(k_1))N_\phi(t_*(k_2))N_\phi^2(t_*(k_{13}))} \left(\frac{k_1 k_2 k_{13}^2}{k_3^2 k_4^2} \right)^{-2\epsilon+\eta} P_\zeta(k_1)P_\zeta(k_2)P_\zeta(k_{13})$$

$$\frac{N_{\phi\phi\phi}(t_*(k_4))}{N_\phi(t_*(k_1))N_\phi(t_*(k_2))N_\phi(t_*(k_3))} \left(\frac{k_1 k_2 k_3}{k_4^3} \right)^{-2\epsilon+\eta} P_\zeta(k_1)P_\zeta(k_2)P_\zeta(k_3)$$

複数場への拡張

[DY+S.Yokoyama+T.Takahashi, in prep]

□ バイスpekトル

$$N_I(k_1)N_J(k_2)N_{KL}(k_3)\underline{w^{IK}(k_1, k_3)}\underline{w^{JL}(k_2, k_3)}P_\zeta(k_1)P_\zeta(k_2)$$

□ トライspekトル

$$w^{IJ}(k_a; k_b) = \frac{1}{N_K N^K} \left(\delta^{IJ} + \ln \left(\frac{k_b}{k_a} \right) \hat{\epsilon}^{IJ} \right)$$

$$\left. \begin{aligned} &N_I(k_1)N_J(k_2)N_{KL}(k_3)N_{MN}(k_4) \\ &\times \underline{w^{IK}(k_1, k_3)}\underline{w^{JK}(k_2, k_4)}\underline{w^{LN}(k_{13}; k_3, k_4)}P_\zeta(k_1)P_\zeta(k_2)P_\zeta(k_{13}) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} &N_I(k_1)N_J(k_2)N_K(k_3)N_{LMN}(k_4)w^{IL}(k_1; k_4) \\ &\times \underline{w^{JK}(k_2; k_4)}\underline{w^{KN}(k_3; k_4)}P_\zeta(k_1)P_\zeta(k_2)P_\zeta(k_3) \end{aligned} \right\}$$

スケール依存性をパラメータ化した 局所型非ガウス性

Note: 複数場の影響として現れる

□ バイスペクトル [Shandera+Dalal+Huterer(2011)]

$$\frac{6}{5} f_{\text{NL}} \left(\frac{k_1 k_2}{k_{\text{piv}}^2} \right)^{\boxed{n_{\text{NL}}^{(m)}}} \left(\frac{k_3}{k_{\text{piv}}} \right)^{\circledast n_{\text{NL}}^{(s)}} P_{\zeta}(k_1) P_{\zeta}(k_2)$$

□ トライスペクトル [DY+S.Yokoyama+T.Takahashi, in prep]

$$\tau_{\text{NL}} \left(\frac{k_1 k_2}{k_{\text{piv}}^2} \right)^{\boxed{n_{\text{NL}}^{(m)}}} \left(\frac{k_3 k_4}{k_{\text{piv}}^2} \right)^{\circledast n_{\text{NL}}^{(s)}} \left(\frac{k_{13}}{k_{\text{piv}}} \right)^{\triangle n_{\text{NL}}^{(\tau)}} P_{\zeta}(k_1) P_{\zeta}(k_2) P_{\zeta}(k_{13})$$

$$\frac{54}{25} g_{\text{NL}} \left(\frac{k_1 k_2 k_3}{k_{\text{piv}}^3} \right)^{\boxed{n_{\text{NL}}^{(m)}}} \left(\frac{k_4}{k_{\text{piv}}} \right)^{\diamond n_{\text{NL}}^{(g)}} P_{\zeta}(k_1) P_{\zeta}(k_2) P_{\zeta}(k_3)$$

モデル

[Byrnes+Enqvist+Takahashi(2010)
Byrnes+Enqvist+Nurmi+Takahashi(2011)
Kobayashi+Takahashi(2012),...]

◆ インフロン+カーバトン

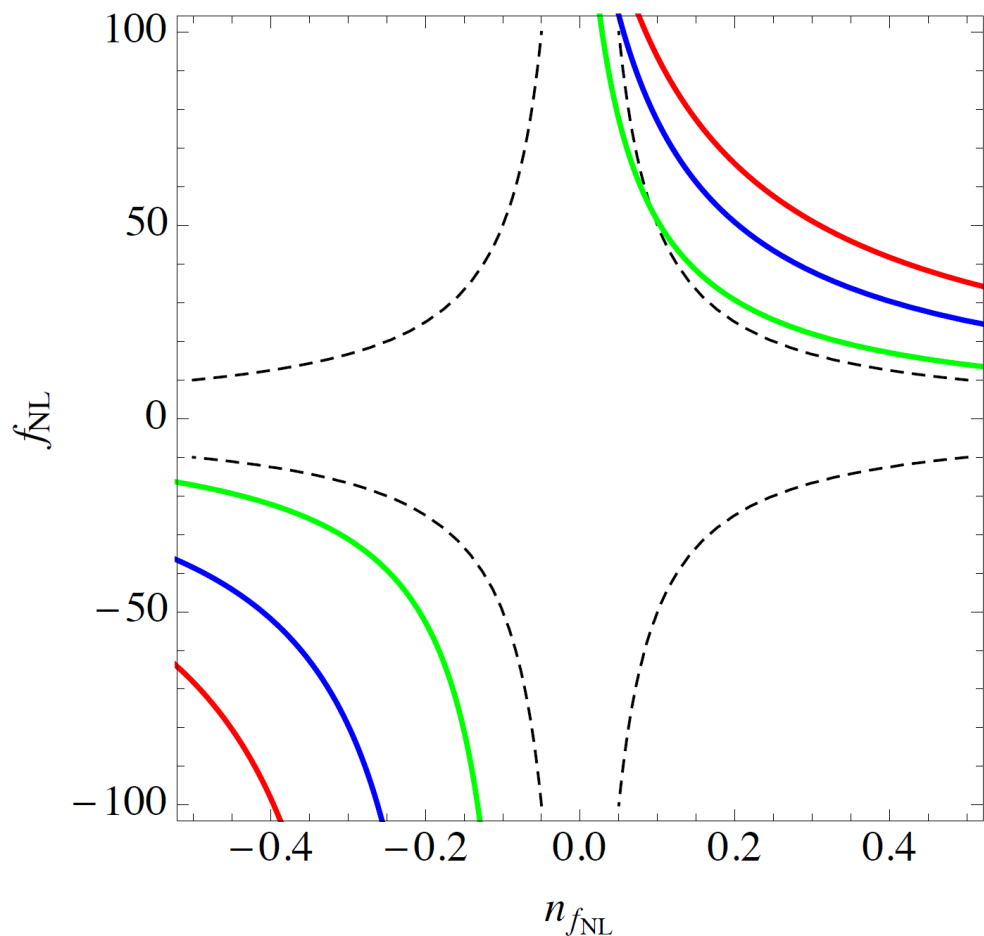
□ $(f_{\text{NL}}, n_{\text{NL}}^{(\mathbf{m})})$ で制限

◆ 自己相互作用するカーバトン

□ $(f_{\text{NL}}, n_{\text{NL}}^{(\mathbf{s})})$ で制限

$$f_{\text{NL}} n_{\text{NL}} \sim \frac{V''''}{3H^2}$$

$$V(\sigma) = \Lambda^4 \left[\left(\frac{\sigma}{f} \right)^2 + \left(\frac{\sigma}{f} \right)^m \right]$$



銀河サーベイへの影響

□ 銀河パワースペクトル (バイスペクトルは略)

$$\frac{P_{\text{gg}}(\mathbf{k})}{P_{\text{L}}(k)} = [b_1 + \Delta b_f(k)] [b_1 + \Delta b_f(k)] \quad [\text{Matsubara(2012)}]$$
$$+ \left[\frac{25\tau_{\text{NL}}}{36(f_{\text{NL}}^2)} \left(\frac{k}{k_{\text{piv}}} \right)^{n_{\text{NL}}^{(\tau)} - 2n_{\text{NL}}^{(m)}} - 1 \right] (\Delta b_f(k))^2$$

◆ スケール依存するバイアスを誘起

$$\Delta b_f(k) \propto \frac{f_{\text{NL}}}{\mathcal{M}(k)} \left(\frac{k}{k_{\text{piv}}} \right)^{n_{\text{NL}}^{(m)}} \propto k^{-2+n_{\text{NL}}^{(m)}}$$

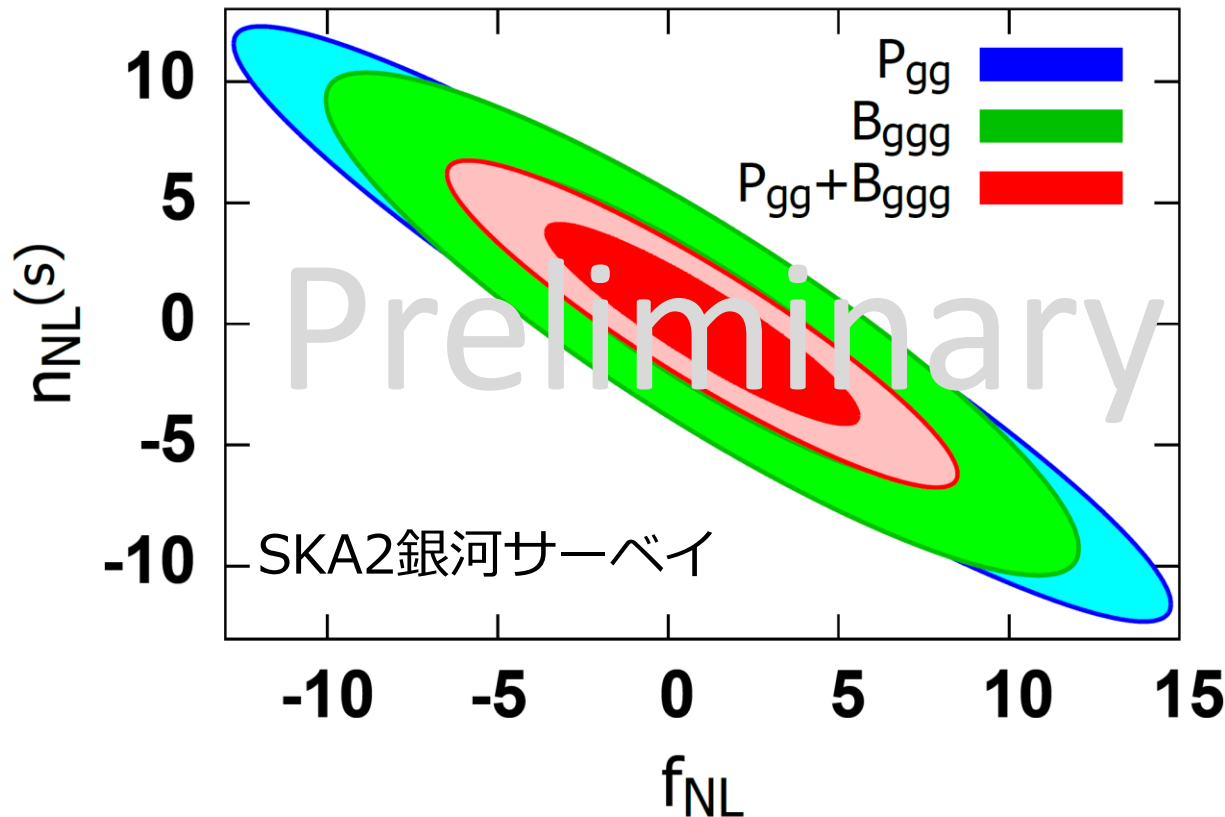
□ $n_{\text{NL}}^{(m)}, n_{\text{NL}}^{(\tau)}$ → スケール依存性を誘起

□ $n_{\text{NL}}^{(s)}$ → 誘起しない (銀河質量依存性のみを生む)

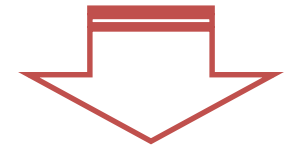
単一ソースモデル

$$\{ f_{\text{NL}}, n_{\text{NL}}^{(s)}, n_{\text{NL}}^{(m)}, \tau_{\text{NL}}, n_{\text{NL}}^{(\tau)}, g_{\text{NL}}, n_{\text{NL}}^{(g)} \}$$

$$+ \{ b_1(z_1), \dots, b_1(z_{\text{zbin}}), b_2(z_1), \dots, b_2(z_{\text{zbin}}) \}$$



$n_{\text{NL}}^{(s)}$ → バイアス
にスケール依存性を
誘起しない

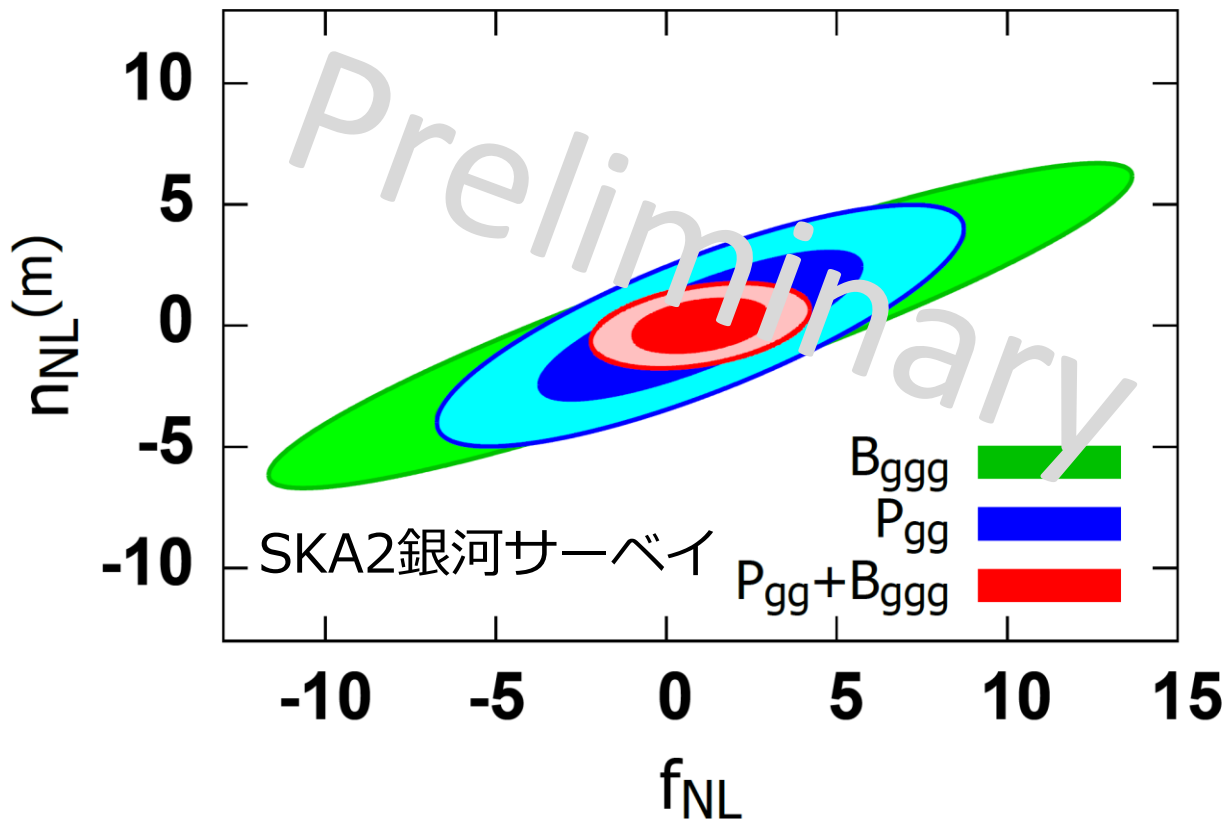


P_{gg} 解析では $n_{\text{NL}}^{(s)}$
は決まりにくく、
 B_{ggg} 解析が有利

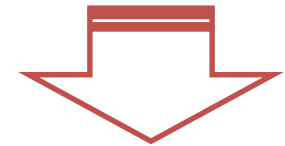
複数ソースモデル

$$\{ f_{\text{NL}}, n_{\text{NL}}^{(s)}, n_{\text{NL}}^{(m)}, \tau_{\text{NL}}, n_{\text{NL}}^{(\tau)}, g_{\text{NL}}, n_{\text{NL}}^{(g)} \}$$

$$+ \{ b_1(z_1), \dots, b_1(z_{\text{zbin}}), b_2(z_1), \dots, b_2(z_{\text{zbin}}) \}$$



$n_{\text{NL}}^{(m)}$ → バイアス
にスケール依存性を
誘起する



P_{gg} 解析で $n_{\text{NL}}^{(m)}$ は
よく決まる

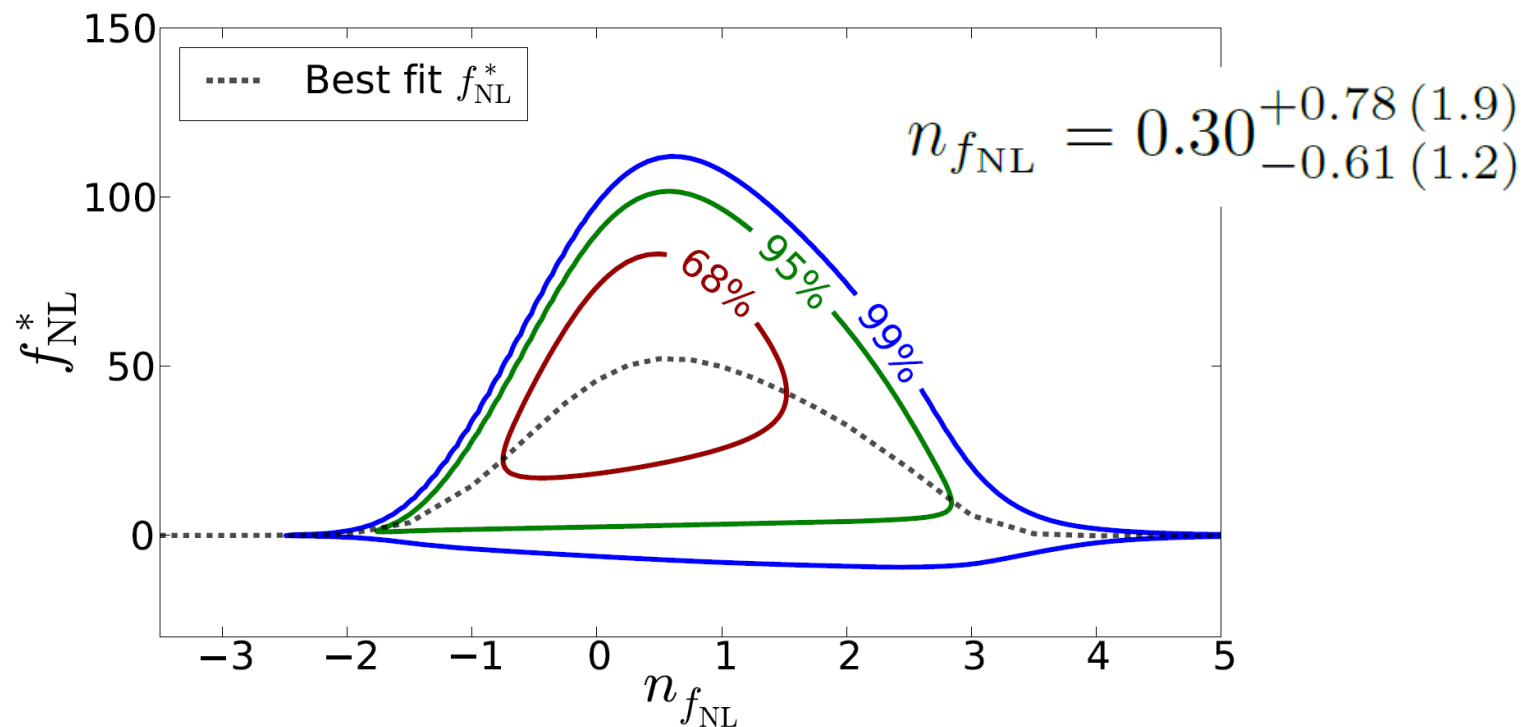
まとめ

- 局所型原始非ガウス性($f_{\text{NL}}, \tau_{\text{NL}}, g_{\text{NL}}$ タイプ)の スケール依存性をslow-rollパラメータの1次精度で求めた
- スケール依存性をパラメータ化した局所型非ガウス性を提案
- 銀河パワースペクトル/バイスペクトルへの局所型原始非ガウス性のスケール依存性の影響を同定

観測的制限[CMB(WMAP)]

$$F(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3) = 2 [f_{\text{NL}}(k_1)P(k_2)P(k_3) + \text{perm.}]$$

□ $n_{f_{\text{NL}}} \rightarrow n_{\text{NL}}^{(s)}$ に対応



観測的制限 [CMB(WMAP)]

□ 単一場 ($f_{\text{NL}}--n_{\text{NG}}=n_{\text{NL}}^{(s)}$)

$$B(k_1, k_2, k_3) \propto f_{\text{NL}} [(k_1 k_2)^{n_\zeta - 4} k_3^{n_{\text{NG}}} + 2 \text{ perms.}]$$

□ 複数場 ($f_{\text{NL}}--n_{\text{NG}}=2n_{\text{NL}}^{(m)}$)

$$B(k_1, k_2, k_3) \propto f_{\text{NL}} [(k_1 k_2)^{n_\zeta + (n_{\text{NG}}/2) - 4} + 2 \text{ perms.}]$$

□ 平均タイプ

$$B(k_1, k_2, k_3) \propto f_{\text{NL}} \left(\frac{k_1 + k_2 + k_3}{3\mathbf{k}_{\text{piv}}} \right)^{n_{\text{NG}}} F(k_1, k_2, k_3)$$

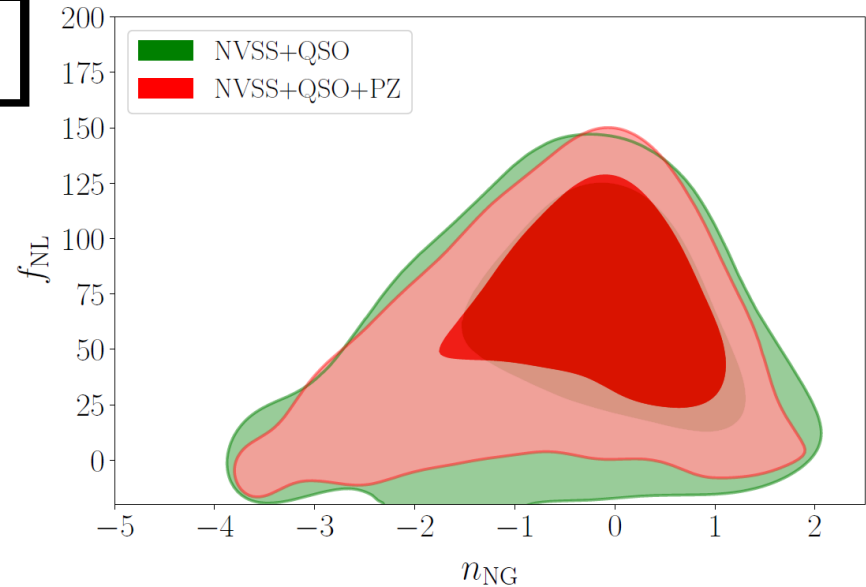
model	n_{NG}	\mathbf{k}_{piv}
one-field (local)	$0.2^{+1.2}_{-0.8}$	0.035 Mpc^{-1}
two-field (local)	$0.4^{+0.8}_{-0.7}$	0.01 Mpc^{-1}
geometric mean (equil.)	$-0.4^{+1.1}_{-0.7}$	0.01 Mpc^{-1}

観測的制限 [LSS]

$$B_{\Phi}(k_1, k_2, k_3) = 2f_{\text{NL}} \times$$

$$\left[\left(\frac{\sqrt{k_1 k_2}}{k_p} \right)^{n_{\text{NG}}} P_{\Phi}(k_1) P_{\Phi}(k_2) + 2\text{Perm} \right]$$

□ $n_{\text{NG}} \rightarrow 2n_{\text{NL}}^{(m)}$ に対応



	f_{NL}			n_{NG}		
	best fit	1σ	2σ	best fit	1σ	2σ
NVSS ACPS	51	[10, 106]	[-53, 144]	0.8	[-0.9, 1.8]	[-2.9, 2.5]
NVSS ACPS+CCPS	53	[14, 103]	[-31, 144]	0.9	[-0.7, 1.8]	[-2.8, 2.4]
QSO ACPS	43	[-7, 108]	[-84, 135]	-0.7	[-2.1, 0.7]	[-3.8, 1.4]
QSO ACPS+CCPS	41	[-4, 107]	[-82, 134]	-0.6	[-1.9, 0.6]	[-3.6, 1.4]
NVSS+QSO ACPS+CCPS	54	[28, 101]	[-18, 132]	0.1	[-0.9, 0.9]	[-2.5, 1.6]
NVSS+QSO+PZ ACPS+CCPS	58	[31, 103]	[-13, 133]	0.2	[-0.8, 0.9]	[-2.4, 1.4]
WMAP7 (Becker & Huterer 2012)	—	—	—	0.3	[-0.3, 1.1]	[-0.9, 2.2]
WMAP9 (Oppizzi et al. 2018)	—	—	—	0.4	[-0.3, 1.2]	—

Some models

- ◆ Model with mixed inflaton and some other field [curvaton/...]

Kobayashi+Takahashi(2012)

Brnes+(2009)(2010)

- ◆ Self-interacting curvaton model

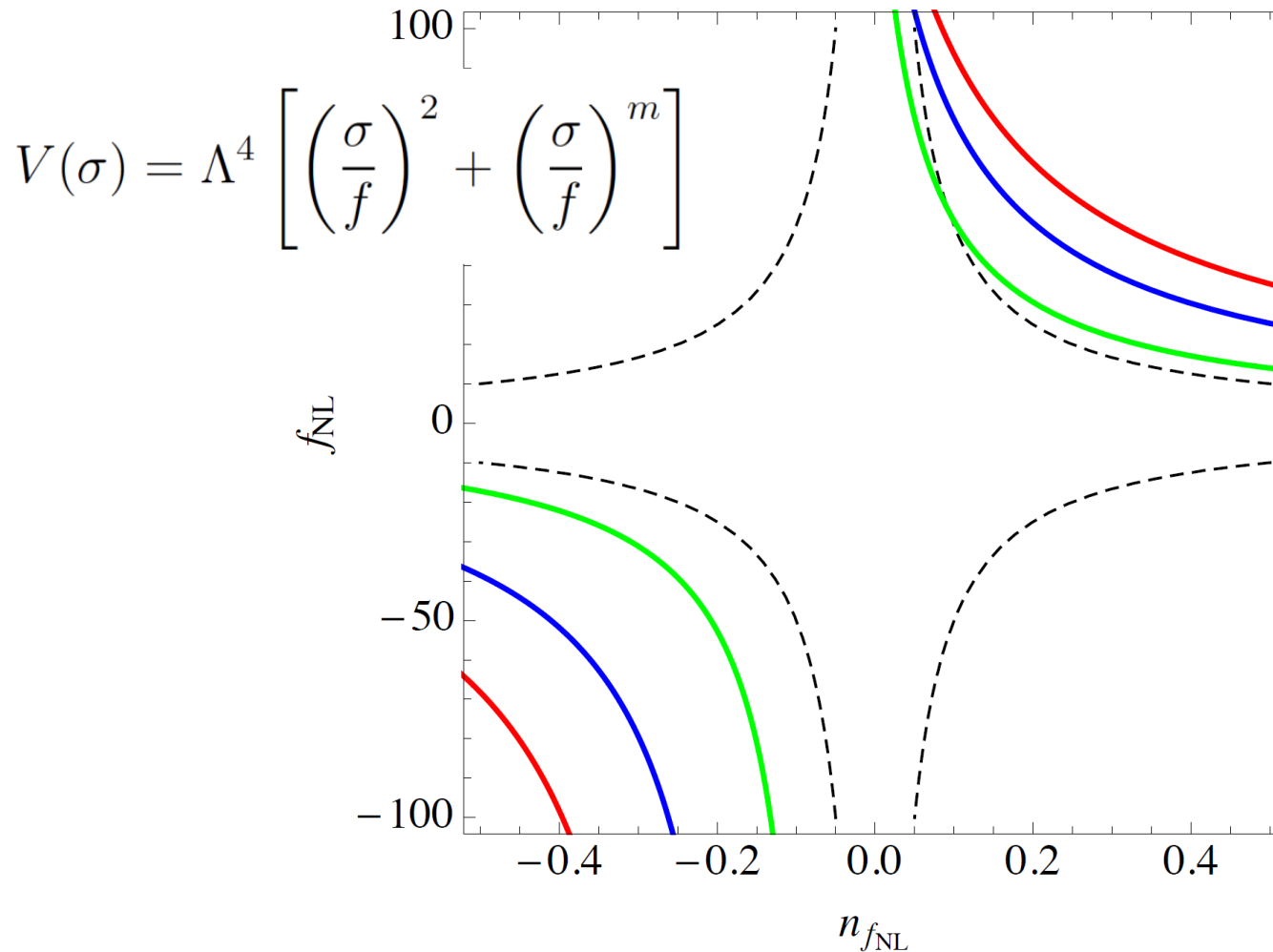
Byrnes+Enqvist+Takahashi(2010)

Byrnes+Enqvist+Nurmi+Takahashi(2011)

Kobayashi+Takahashi(2012)

$$f_{\text{NL}} n_{\text{NL}} \sim \frac{V'''}{3H^2}$$

Self-interacting curvaton



Kobayashi+Takahashi(2012)

Scale-dependent PNG models

◆ 場の計量の効果入りスケール依存する f_{NL} 公式

Byrnes+Gong(2012)

◆ スケール依存する $\tau_{\text{NL}}, g_{\text{NL}}$

Byrnes+Gerstenlauer+Nurmi+Tasinato+Wands(2010)

複数ソース

$$\{ f_{\text{NL}}, n_{\text{NL}}^{(s)}, n_{\text{NL}}^{(m)}, \tau_{\text{NL}}, n_{\text{NL}}^{(\tau)}, g_{\text{NL}}, n_{\text{NL}}^{(g)} \}$$

$$+ \{ b_1(z_1), \dots, b_1(z_{z\text{bin}}), b_2(z_1), \dots, b_2(z_{z\text{bin}}) \}$$

