

銀河の測光サーベイから探る原始非ガウス性

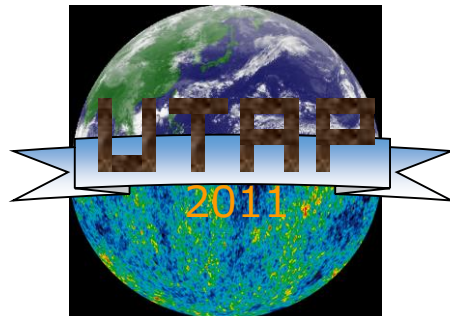
～ 増光効果の影響 ～

並河 俊弥 (東大理 D1)

共同研究者

岡村 雅普 (東北理)

樽家 篤史 (東大ビッグバン、IPMU)



RAキャンプ、2月17日－2月19日、静岡

イントロダクション

宇宙初期の揺らぎは、どのような統計分布に従って生成されたか

(単純な) インフレーションではほぼガウス分布

原始揺らぎの生成機構 (インフレーション) を理解する手段として、ガウス分布からのずれ (原始非ガウス性) の検証が行われている

ガウス統計に従う場

$$\Phi(x) = \phi(x) + f_{NL}[\phi^2(x) - \langle \phi^2 \rangle]$$

曲率揺らぎ

原始非ガウス性の寄与を
このようにモデル化

検証方法

1. 三点相関

ガウス分布だと奇数点の相関はゼロなので、検出できれば
非ガウス性の証拠

現在の制限は $-10 < f_{\text{NL}} < 74$ (95% C. L.) (Komatsu+'10)

2. 銀河バイアス

銀河数密度揺らぎを、物質揺らぎと関連付ける量にも原始非ガウス性の情報が含まれる (e.g. Dalal+'08)

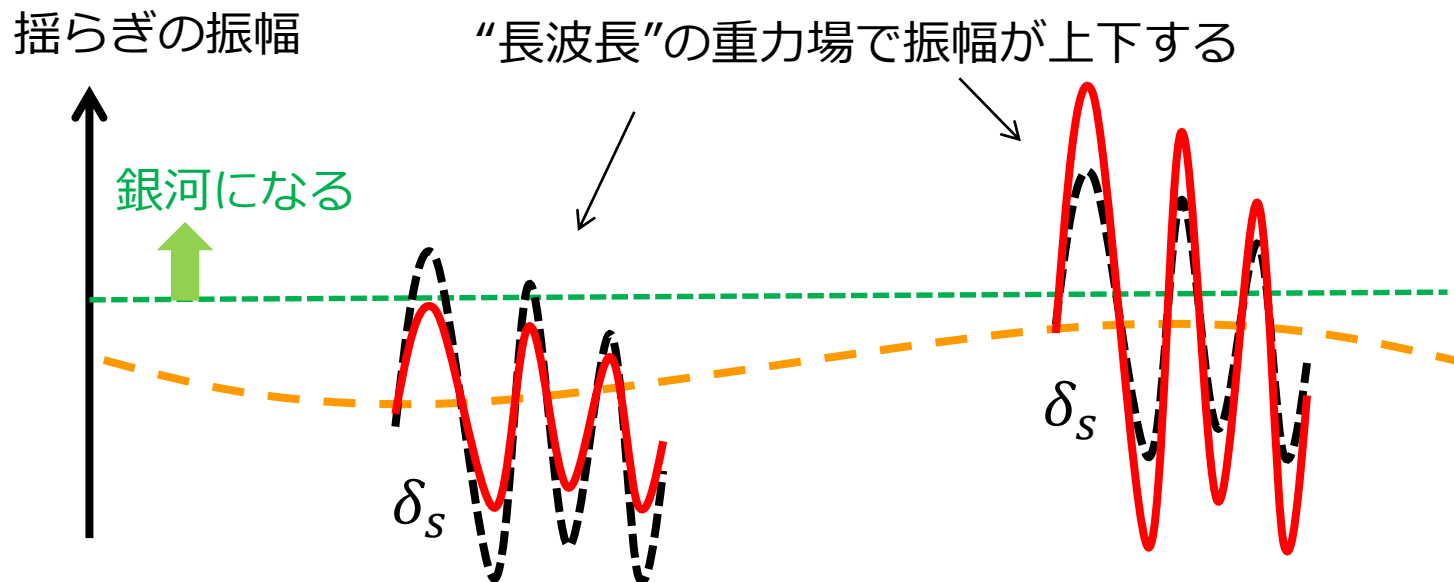
$$\frac{n_g(x) - \bar{n}_g}{\bar{n}_g} = \delta_g(x) = b \delta_m(x)$$

銀河バイアス

現在の制限は $-29 < f_{\text{NL}} < 70$ (95% C. L.) (Slosar+'08)

原始非ガウス性を作る銀河バイアス

長波長と短波長の揺らぎは、非ガウス性でカップルする



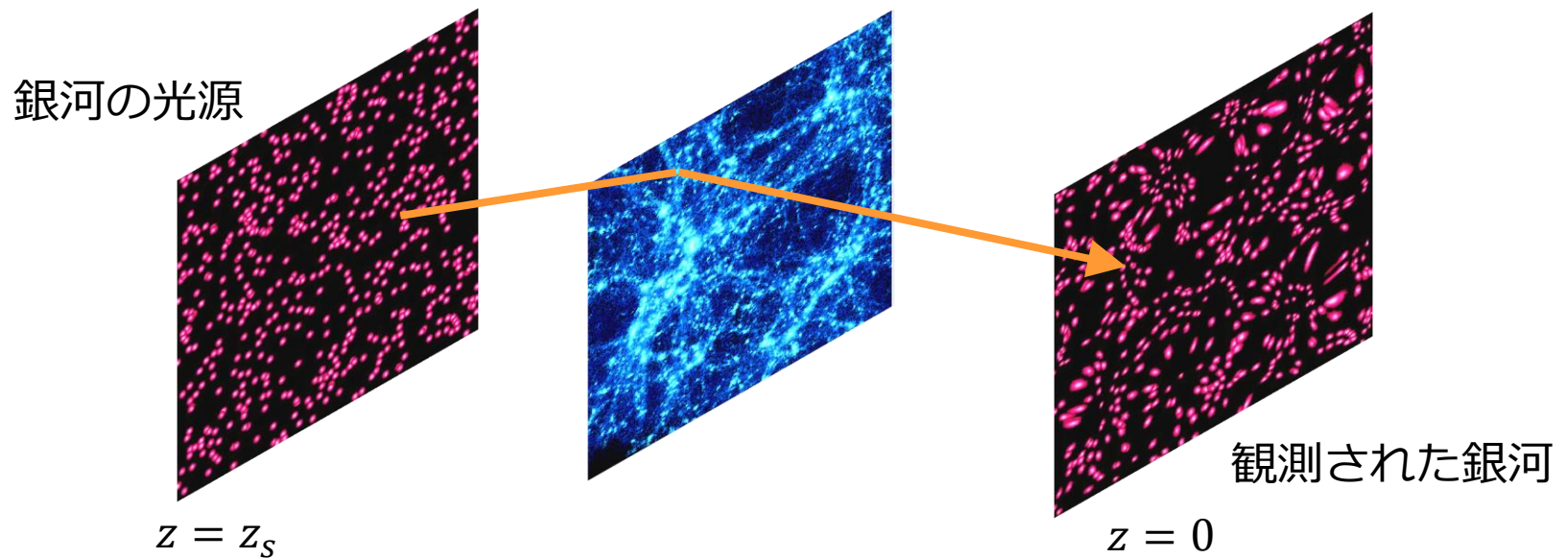
$$\delta_g \sim \delta_s + 2f_{NL}\phi_\ell\delta_s \quad \text{“長波長”の重力場による補正}$$

$$\downarrow (\delta_s = b\delta_m)$$

$$\delta_g = (b + f_{NL}\Delta b)\delta_m$$

スケール依存する

銀河サーベイでの観測量



銀河数密度	δ_g	b を通した f_{NL} の情報を 含む
銀河の歪み (シア)	γ	b を通した f_{NL} の情報を 含まない

ただし、シアも f_{NL} の制限に使える (次のスライド)

観測量→統計量（角度パワースペクトル）

[解析の流れ]

δ_g, γ → フーリエ分解（球面調和展開）

→ 各モードの振幅＝角度パワースペクトルの測定

$$C_\ell^{XY} = \frac{\sum_{m=-\ell}^{\ell} |X_{\ell m}|^2}{2\ell + 1}$$



理論と観測の比較から f_{NL} を推定

理論の角度パワースペクトル

銀河バイアス b が f_{NL} に依存

$$C_\ell^{gg} \propto b^2 P_m(k, z_s)$$

$$C_\ell^{g\gamma} \propto \int_0^{z_s} dz b P_m(k, z) W(z)$$

$P_m(k, z)$: 密度揺らぎの相関

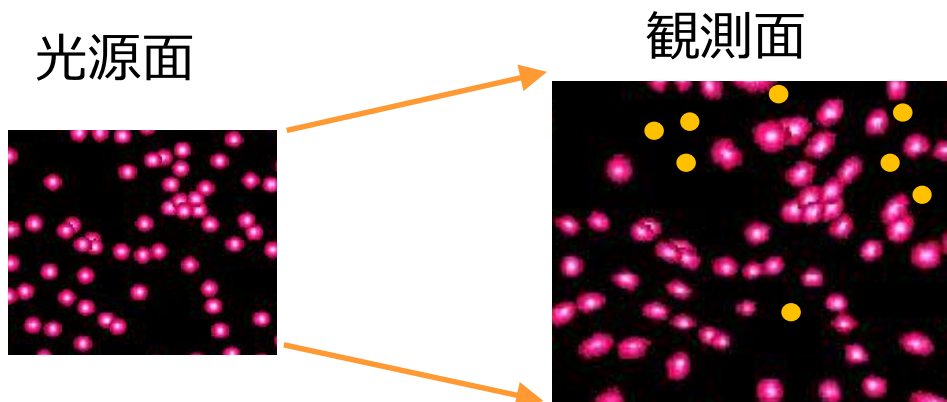
$W(z)$: 重力レンズのカーネル

シアと数密度の相関にも f_{NL} の情報がある

増光効果

大規模構造による弱重力レンズで銀河の個数密度は変化

(Moessner+'98, Matsubara 00)



増光効果 = 限界等級より暗い銀河が増光されて見える効果 — レンズによる単位面積の変化

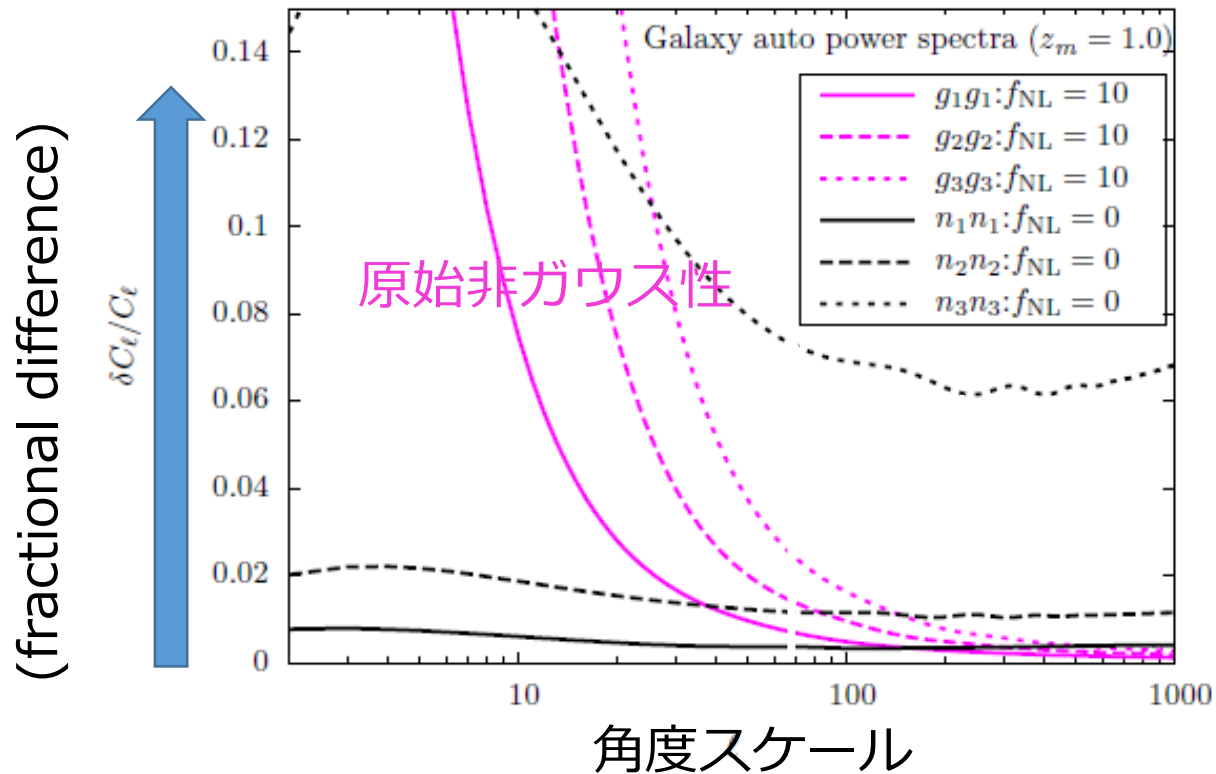
観測される揺らぎ

$$\delta_n = \delta_g + (5s - 2)\kappa$$

slope

convergence

増光効果の影響



増光効果, f_{NL} の影響は共に大角度スケールで大きくなる傾向

増光効果によって f_{NL} の推定値がバイアスされる可能性がある

Fisher解析による定量的評価

Fisher 解析に基づき、以下について調べる

1. 原始非ガウス性の検出における増光効果の影響
2. シアも組み合わせるとどうなるか

関連した研究について

銀河を用いた f_{NL} への制限の見積もり

e.g. Carbone+ 08, Afshordi & Tolley 08, Takeuchi+ 10

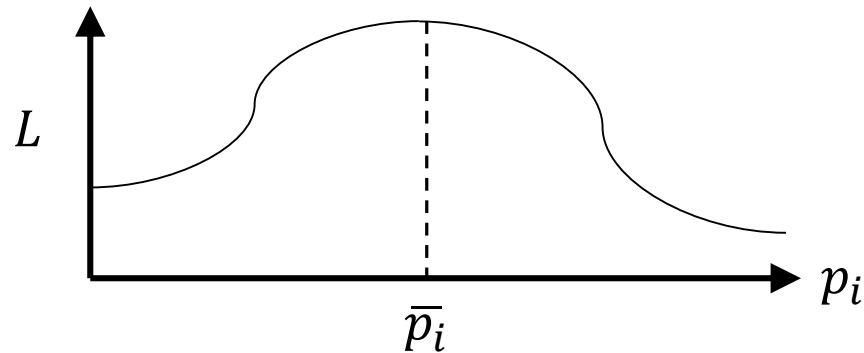
本研究の特色

1. 増光効果を考慮しなかった場合、 f_{NL} の中心値の推定のずれ、決定精度に与える影響を調べる
2. 個数密度だけでなく、シアも組み合わせる

Fisher解析

- 最尤法に基づいて、パラメータを推定、あるいは決定精度を予測

最尤法 = 尤度関数（確率分布関数）が最大となる点を推定値として採用



多くは、尤度関数として、揺らぎがGauss分布であるとしたものを利用

$$\text{(例)} \quad -2\ln L = \sum_{\ell} \frac{(2\ell + 1)}{2} \left[-\ln \hat{C}_{\ell} + \frac{(C_{\ell}^{\text{data}} - \hat{C}_{\ell})^2}{\hat{C}_{\ell}^2} \right]$$

$C_{\ell}^{\text{data}} = (C_{\ell}^{gg}, C_{\ell}^{g\gamma}, C_{\ell}^{\gamma\gamma})$: 利用する角度パワースペクトル

\hat{C}_{ℓ} : C_{ℓ} + 観測によるノイズを含める

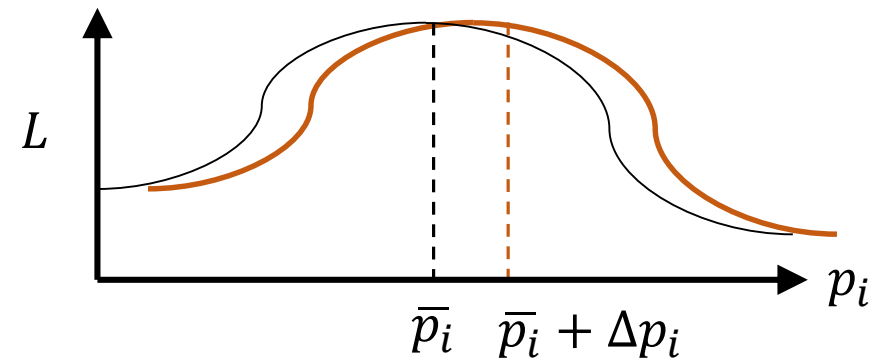
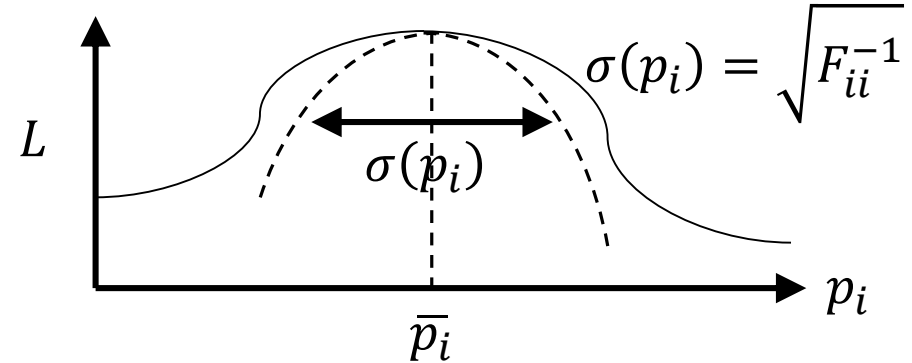
Fisher解析

- 以下のFisher情報行列を用いて、制限の期待値を見積もれる

Fisher情報行列
= “基準点” 周りでの尤度関数の曲率

$$F_{ij} = - \left\langle \frac{\partial^2 \ln L}{\partial p_i \partial p_j} \right\rangle \bigg|_{p=\bar{p}}$$

$$= \sum_{\ell} \frac{1}{2} \text{Tr} \left(\hat{C}_{\ell}^{-1} \frac{\partial C_{\ell}}{\partial p_i} \hat{C}_{\ell}^{-1} \frac{\partial C_{\ell}}{\partial p_j} \right) \bigg|_{p=\bar{p}}$$



- 系統誤差の見積もり

$$\Delta p_i = \sum_j \tilde{F}_{ij}^{-1} \sum_{\ell} \text{Tr} \left(\tilde{C}_{\ell}^{-1} \frac{\partial \tilde{C}_{\ell}}{\partial p_j} \tilde{C}_{\ell}^{-1} (C_{\ell} - \tilde{C}_{\ell}) \right)$$

\tilde{X} : 誤ったパワースペクトルで計算

Fisher解析

理論・観測の基準モデル

flat Λ CDM, $f_{\text{NL}} = 0$ のもとで計算

銀河バイアス $b = b_0 + b_z/D(z) + (f_{\text{NL}} \text{の寄与})$

Slope の値 $s_1, s_2, s_3 = 0.5, 1.0, 1.5$

全パラメータ $p = (\Omega_b h^2, \Omega_m h^2, \Omega_\Lambda, w, A_s, n_s, \tau, f_{\text{NL}}, b_0, b_z, s_1, s_2, s_3)$

想定するサーベイ

Subaru-HSC	2000 deg ²	$z_m = 1$	35個/arcmin ²
------------	-----------------------	-----------	-------------------------

LSST	20000 deg ²	$z_m = 1.5$	50個/arcmin ²
------	------------------------	-------------	-------------------------

* パラメータの縮退を解くため、CMB観測（Planck）の情報も入れる

これらをもとに Fisher 行列を求め、以下の計算を行う：

1. f_{NL} の決定精度
2. 増光効果を理論モデルに入れなかった場合の中心値のずれ

結果

	HSC		LSST	
	$\sigma(f_{\text{NL}})$	Δf_{NL}	$\sigma(f_{\text{NL}})$	Δf_{NL}
銀河数密度のみ				
増光効果を考慮	4.8	-	0.86	-
増光効果を考慮しないで推定	4.7	11	0.86	7.1
増光効果を考慮	3.5	-	0.49	-
増光効果を考慮しないで推定	3.5	0.19	0.49	-0.76

シアを加えた場合

銀河数密度だけだと、系統誤差は無視できない (1σ の2倍以上)

LSSTはHSCに比べ、制限が大きく改善 (約5倍)

ただし、LSSTの場合はシアを組み合わせても系統誤差は無視できない

まとめ

調べたこと

測光サーベイから f_{NL} の制限を行うさい、

- ✓ 増光効果の影響
- ✓ シアも組み合わせるとどうなるか

明らかにしたこと

f_{NL} への制限は、シアも組み合わせれば約1.5-2倍の改善が見込める

LSST ほどの深いサーベイでは、シアを加えても増光効果による系統誤差に注意が必要