

東京大学宇宙理論研究室
修士1年 鄭昇明

ボイド体積分布関数による 初期揺らぎの非ガウス性への制限

Kamionkowski et al.(2009)のレビュー

もくじ

- Introduction
 - ボイドとインフレーション
 - 初期揺らぎの非ガウス性
- ボイド体積分布関数の導出
 - Press-Schechter like approach
- 非ガウス性の検出可能性
 - f_{NL} への制限
- まとめ

もくじ

- Introduction
 - ボイドとインフレーション
 - 初期揺らぎの非ガウス性
- ボイド体積分布関数の導出
 - Press-Schechter like approach
- 非ガウス性の検出可能性
 - f_{NL} への制限
- まとめ

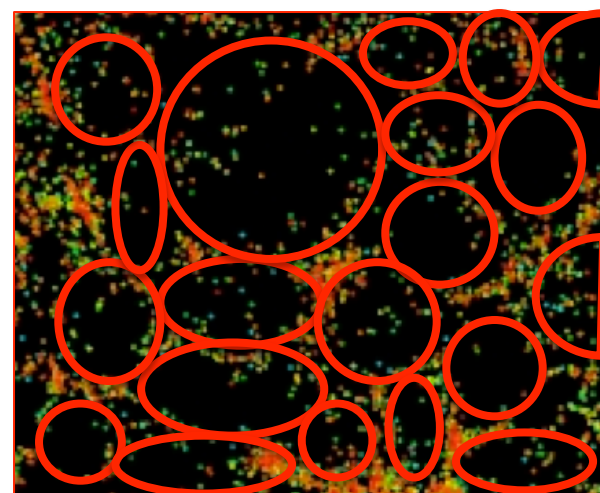
ボイド宇宙論

宇宙のほとんどは
ボイド！

- 通常の宇宙論⇒光っているもの（銀河など）に着目する。

しかし

宇宙の何もない部分（ボイド）に着目することでも、宇宙論的情報が得られるのでは！？



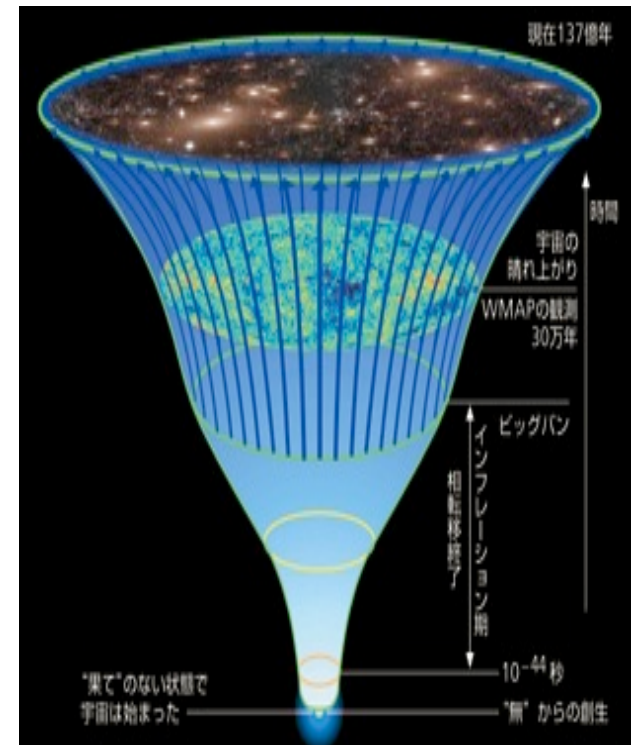
宇宙の銀河分布 (SDSS)

➡ **ボイド宇宙論**

特に今回はボイドを用いて**インフレーションに制限を与えることを考える。**

インフレーションと初期揺らぎ

- 標準宇宙モデルの様々な問題を一挙に解決する理論として**インフレーション理論**が考えられている。
- インフレーションによってできた揺らぎの種 (**宇宙の初期揺らぎ**) が成長して現在の大規模構造を作っている。
- 現在の宇宙の構造を見ればインフレーションの痕跡を見ることができるかもしれない。



初期揺らぎの非ガウス性

- 初期揺らぎは現在の観測精度ではガウス分布に従っているが、観測精度を上げていくと**ガウス分布からのずれ(非ガウス性)**が見つかるかもしれない。

今回は f_{NL} までの項を考える。

$$\Phi = \Phi_G + f_{NL}(\Phi_G^2 - \langle \Phi_G^2 \rangle) + \dots$$

初期揺らぎ ガウス場

ガウス場からのずれ

〔Localモデルの場合〕

$$\left[\begin{array}{l} f_{NL} = 0 \longrightarrow \text{非ガウス性なし} \\ f_{NL} \neq 0 \longrightarrow \text{非ガウス性あり} \end{array} \right.$$

現在の制限 (WMAP)

$$-10 < f_{NL} < 74$$

(Komatsu et al. 2011)

➡ f_{NL} は非ガウス性の度合いを表すパラメーター

もくじ

- Introduction
 - ボイドとインフレーション
- **ボイド体積分布関数の導出**
 - Press-Schechter like approach
- 非ガウス性の検出可能性
 - f_{NL} への制限
- まとめ

非ガウス性の影響は？

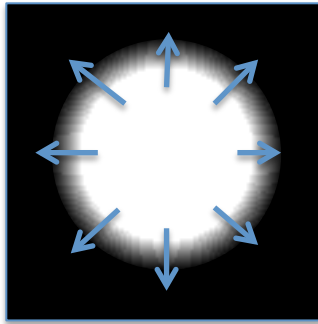
Press-Schechter like approach

- haloで使われる手法を応用する
 - 初期揺らぎの分布 $P(\delta)$ がガウス分布に従う場合

ボイド

$$\delta < \delta_v$$

密度が小さい領域は膨張し続ける。

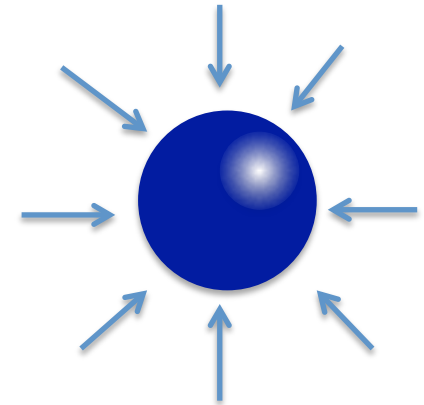


この部分がボイドになる

halo

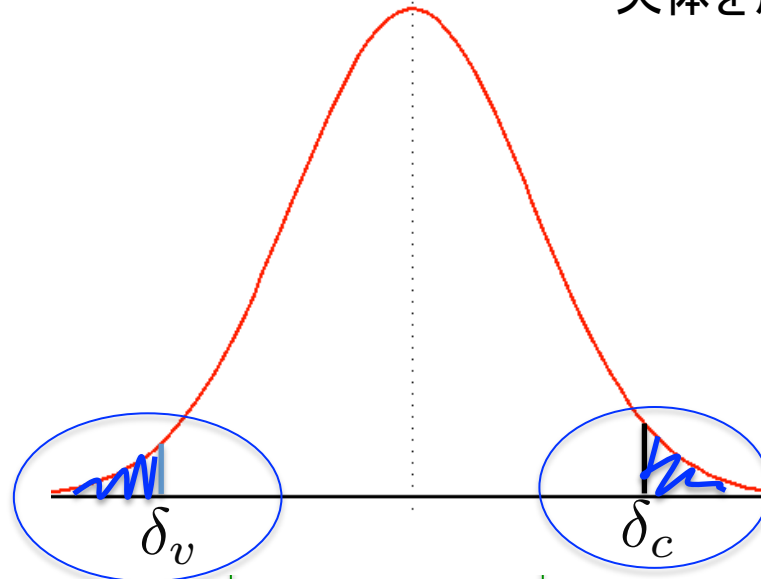
$$\delta > \delta_c = 1.69$$

密度が大きいと重力的に崩壊して天体を形成する。



δ
この部分がhaloになる

$P(\delta)$



非ガウス性も考慮に入れると・・・

- Edgeworth expansion

$$P(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad \text{: ガウス分布の場合}$$



非ガウス性の効果
(高次の項を無視)

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \left[1 + \sigma \frac{S_3(R)}{6} H_3(\delta/\sigma) + \dots \right]$$

$$S_3 \propto f_{NL}$$

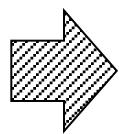
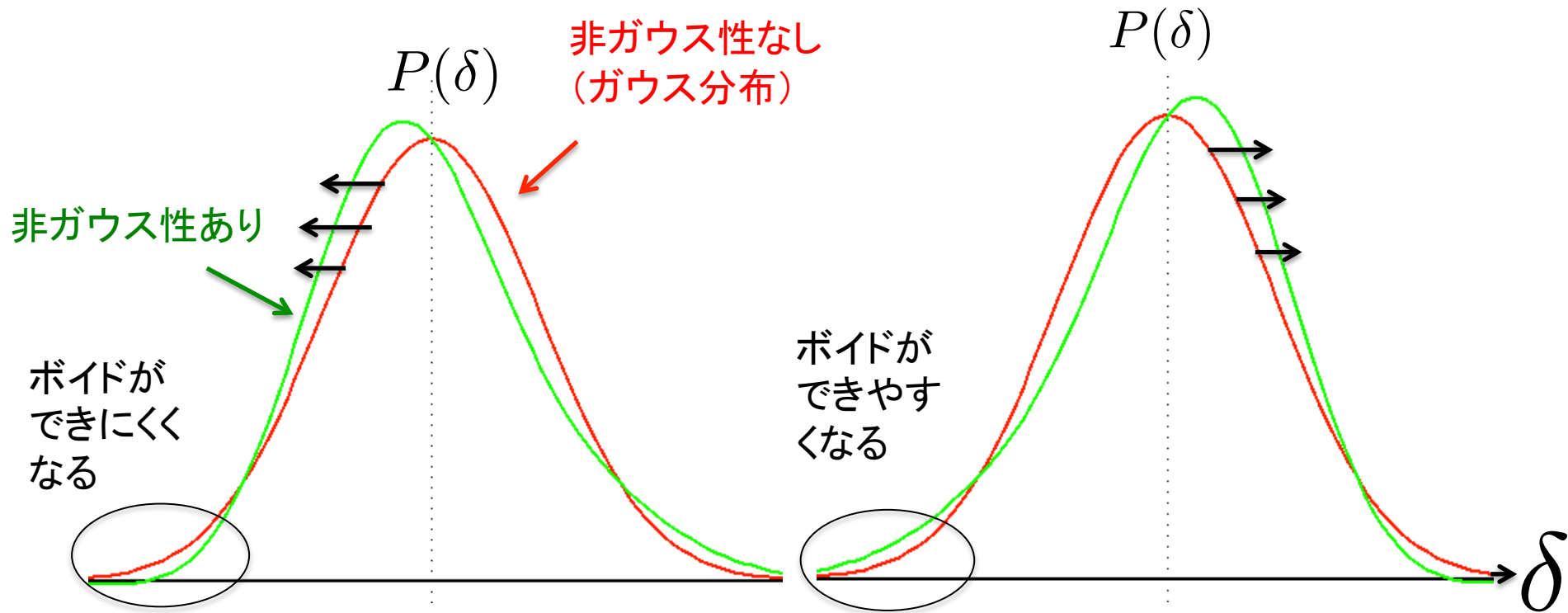
(local modelの場合)

□ 初期揺らぎをエルミート多項式 $H_n(x)$ で展開

□ S_3 はスケールに依存する:
$$S_3 = \frac{\langle \delta^3 \rangle}{\langle \delta^2 \rangle^2}$$

$S_3 > 0$ の時

$S_3 < 0$ の時



S_3 はボイドの
できやすさを表す
物理量であると
考えられる！

ボイド体積分布関数

- ボイドの観測量として体積分布関数を考える。
 - 半径Rのボイドがどの程度存在するか？

$\frac{dn}{dR}$: 半径Rのボイドの数密度

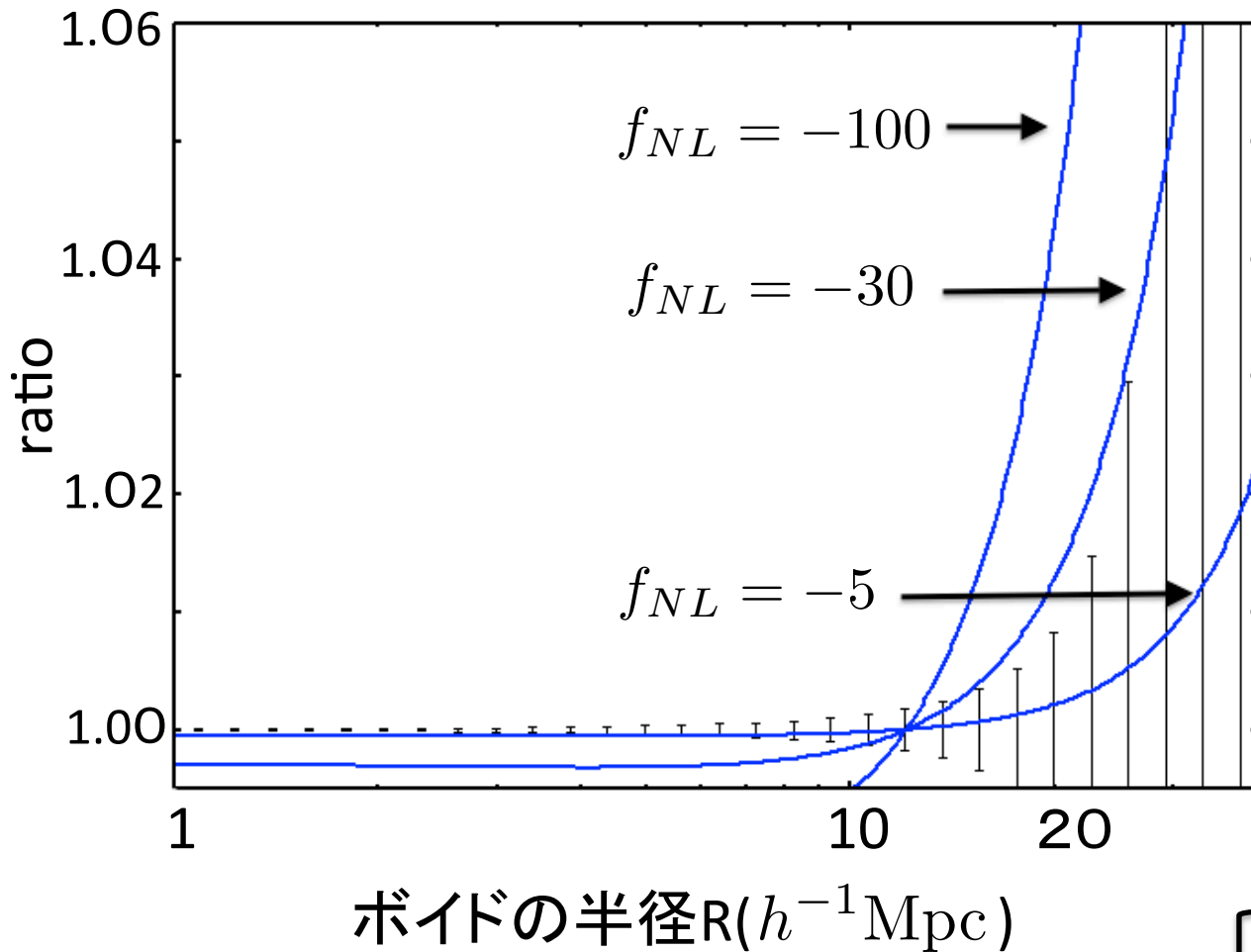
$$\frac{dn}{dR} = \frac{9}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{R^4} e^{-\delta_v^2/2\sigma_M^2} \left| \frac{d \ln \sigma_M}{d \ln M} \right| \frac{|\delta_v|}{\sigma_M} \quad \text{: ガウス分布の場合}$$



非ガウス性
の効果

$$\frac{dn}{dR} = \frac{9}{2\pi^2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{R^4} e^{-\delta_v^2/2\sigma_M^2} \left\{ \left| \frac{d \ln \sigma_M}{d \ln M} \right| \left[\frac{|\delta_v|}{\sigma_M} - \frac{S_3 \sigma_M}{6} \left(\frac{\delta_v^4}{\sigma_M^4} - 2 \frac{\delta_v^2}{\sigma_M^2} - 1 \right) \right] + \frac{1}{6} \frac{dS_3}{dM} \sigma_M \left(\frac{\delta_v^2}{\sigma_M^2} - 1 \right) \right\}.$$

非ガウス性はどこで見える？



青線は f_{NL} の値を変化させて非ガウス性を考慮した場合と考慮しなかった場合のボイド数密度の比をプロットしたもの。

エラーバーはボイドの数が統計的に少ないことからくるポアソンエラー。($z = 0.8 \pm 0.15$, 30,000square degree)

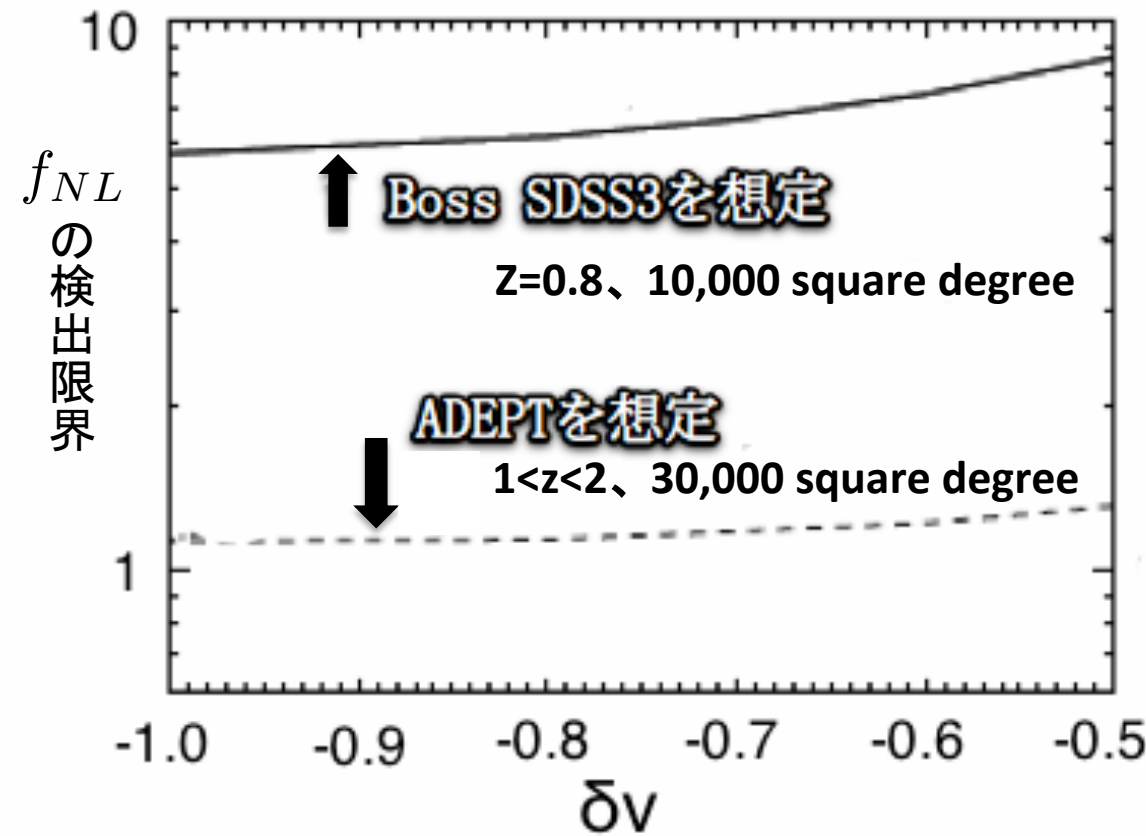
$R > 10\text{Mpc}$ で違いが現れる。
 $|f_{NL}| \gtrsim 30$ で見える。

もくじ

- Introduction
 - ボイドとインフレーション
- ボイド体積分布関数の導出
 - Press-Schechter like approach
- **非ガウス性の検出可能性**
 - f_{NL} への制限
- まとめ

今後の観測を想定して...

非ガウス性の観測可能性

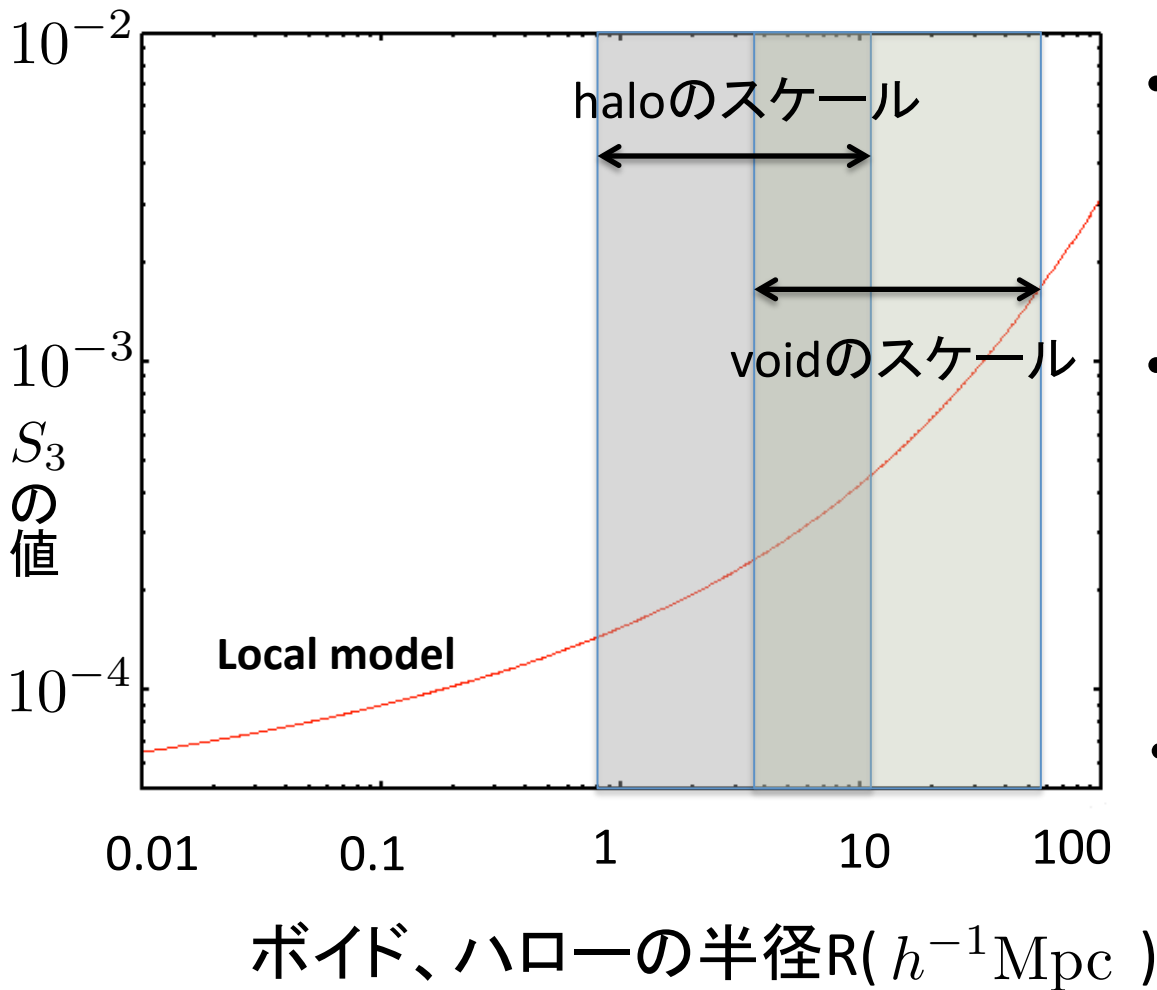


今後の大規模サーベイを想定したときの f_{NL} の検出限界。 f_{NL} がこれより小さいとポアソンエラーで見えなくなってしまう。

この図より f_{NL} の検出限界は δv の値にあまり影響されないことがわかる。

⇒ 今後の銀河サーベイだと $f_{NL} \lesssim 10$ まで検出可能！

ハロー vs ボイド



- S_3 のスケール依存性をプロットしたもの ($f_{NL} = 1$ に固定)
- ボイドの方が大きなスケールにまたがっているので非ガウス性を観測しやすい。
- ボイドを用いることで halo や CMB とは独立した観測手段になることが期待される。

まとめ、今後の課題

- ボイドを観測することで初期揺らぎの非ガウス性を観測できる可能性がある。
 - Local model以外のモデルでも並行して議論できる。
特に非ガウス性が**スケール依存性**を持つ場合、ボイドスケールでの観測は重要である。
- 理論面での問題 (void-in-cloud等)、観測での問題 (遠くの暗い銀河は観測できない等) があるのでまだまだ改善の余地はある。