

Hu, W., Sawicki, I. 2007, Phys. rev. D, 76, 064004,
arXiv:0705.1158v1[astro-ph]

HU & SAWICKIモデル による宇宙の加速膨張

～重力理論修正の可能性～

東京大学 宇宙理論研究室 吉田研M1
早津 夏己

一般相対論のおさらい

・宇宙は加速膨張している！

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

⇒でも,宇宙定数 Λ は...

物理的解釈が明確でない。

:物質由来のエネルギーに対応させると、

$$P_{\Lambda} = -\frac{\Lambda}{8\pi G}$$

:真空のエネルギーで表現すると...



⇒一般相対論は少し違うかも？

➡修正重力理論！



図1 宇宙の加速膨張を示す観測事実

負の圧力

理論的予測と
100桁以上の差
(宇宙定数問題)

f(R)重力理論

・一般のf(R) model

$$S_g = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{R + f(R)}{2\kappa^2} \right], \kappa^2 = 8\pi G$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{宇宙定数なし} : \lim_{R \rightarrow 0} f(R) = 0 \\ \Lambda\text{CDMモデル} : \lim_{R \rightarrow \infty} f(R) = \text{const.} \\ \text{をまねたい} \end{array} \right.$$

* 宇宙定数なしで観測に合う宇宙の**加速膨張**を記述

* **ダークエネルギー**の源は、

物質由来でなく、**時空の幾何学**に由来 とする。

HU&SAWICKI MODEL

$$m^2/R \rightarrow 0$$

$$f(R) = -m^2 \frac{c_1(R/m^2)^n}{c_2(R/m^2)^n + 1} \rightarrow -\frac{c_1}{c_2}m^2 + \frac{c_1}{c_2^2}m^2\left(\frac{m^2}{R}\right)^n,$$

⇒パラメーター $\frac{c_1}{c_2}$, $\frac{c_1}{c_2^2}$, n に制限を付けよう！

$$(m^2 \equiv \frac{\kappa^2 \bar{\rho}_0}{3})$$

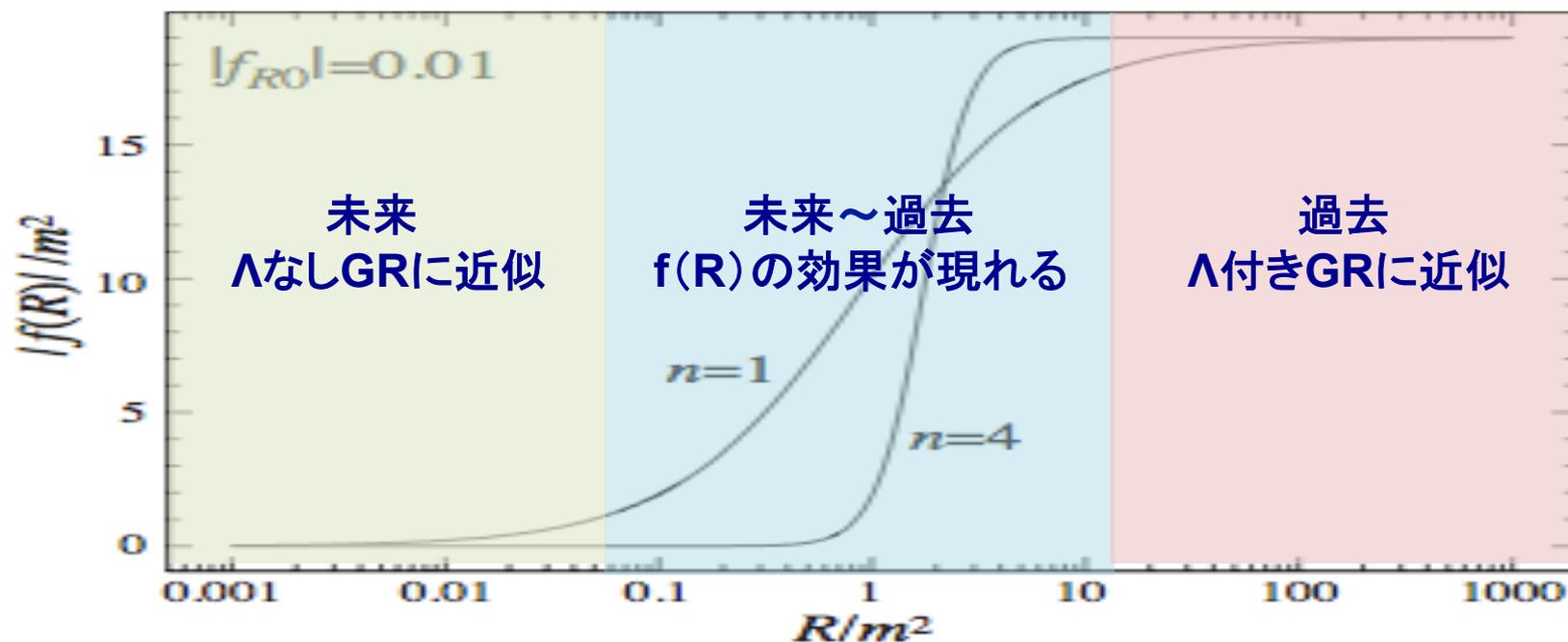


図2 Hu&Sawicki model @宇宙論スケール

発表の流れ

・ 宇宙論スケール

...観測と同じダークエネルギーの振る舞い

$$\Rightarrow \text{より小さい } \frac{c_1}{c_2} (\propto f_{R0})$$

...観測と同じ加速膨張 $\Rightarrow \frac{c_1}{c_2} \approx 6 \frac{\tilde{\Omega}_\Lambda}{\tilde{\Omega}_m}$

・ 局所スケール

...GRと同じくらい現象を正しく記述

:太陽近傍 $\Rightarrow \text{より小さい } \frac{c_1}{c_2} (\propto f_{R0})$

:銀河スケール $\Rightarrow \text{より小さい } n$

$$\frac{c_1}{c_2} \propto |f_{R0}| < 74 (1.23 \times 10^6)^{n-1} \left[\frac{R_0 \Omega_m h^2}{m^2 0.13} \right]^{-(n+1)}$$

$$|f_{R0}| \lesssim 2 \times 10^{-6} \left(\frac{v_{\max}}{300 \text{ km/s}} \right)^2$$

宇宙論スケール(有効状態方程式)

- 修正されたアインシュタイン方程式:

$$G_{\alpha\beta} + f_R R_{\alpha\beta} - \left(\frac{f}{2} - \square f_R \right) g_{\alpha\beta} - \nabla_\alpha \nabla_\beta f_R = \kappa^2 T_{\alpha\beta}$$

から、有効状態方程式を考える: $P_{eff} = w_{eff} \rho_{eff}$

⇒観測的な制限より

$$|1 + w_{eff}| \lesssim 0.2$$



$$f_{R0} \ll 1 \iff R_0 \gg m^2$$

⇒high-Rでの近似形がどこでも使える!

$$f(R) \rightarrow -\frac{c_1}{c_2} m^2 + \frac{c_1}{c_2^2} m^2 \left(\frac{m^2}{R} \right)^n$$

$$\frac{c_1}{c_2} \approx 6 \frac{\tilde{\Omega}_\Lambda}{\tilde{\Omega}_m}$$



HSモデルで加速膨張できる!

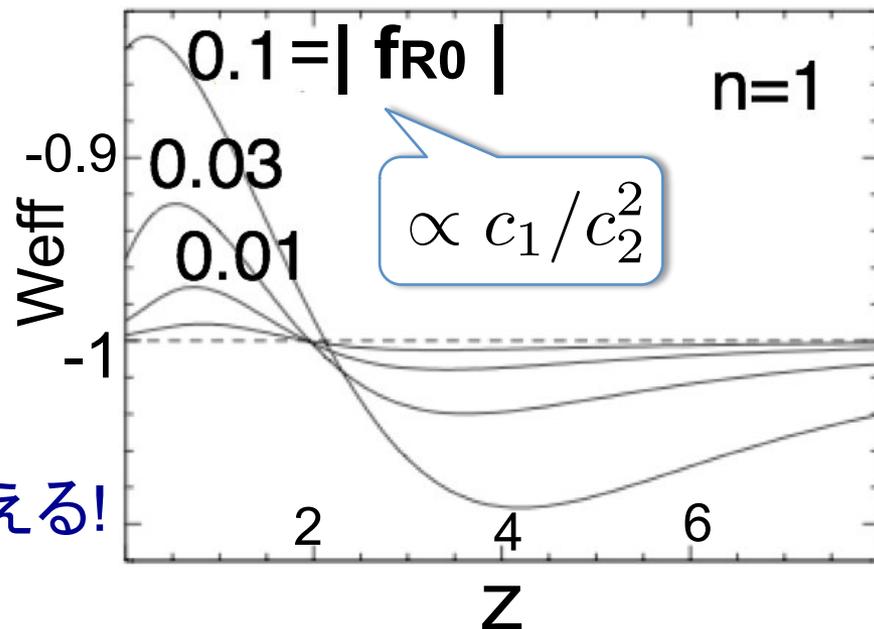


図3 w_{eff} の Λ CDMモデルからのずれ

局所スケール(太陽近傍)

- 観測的に正しいとされる密度分布を与える。

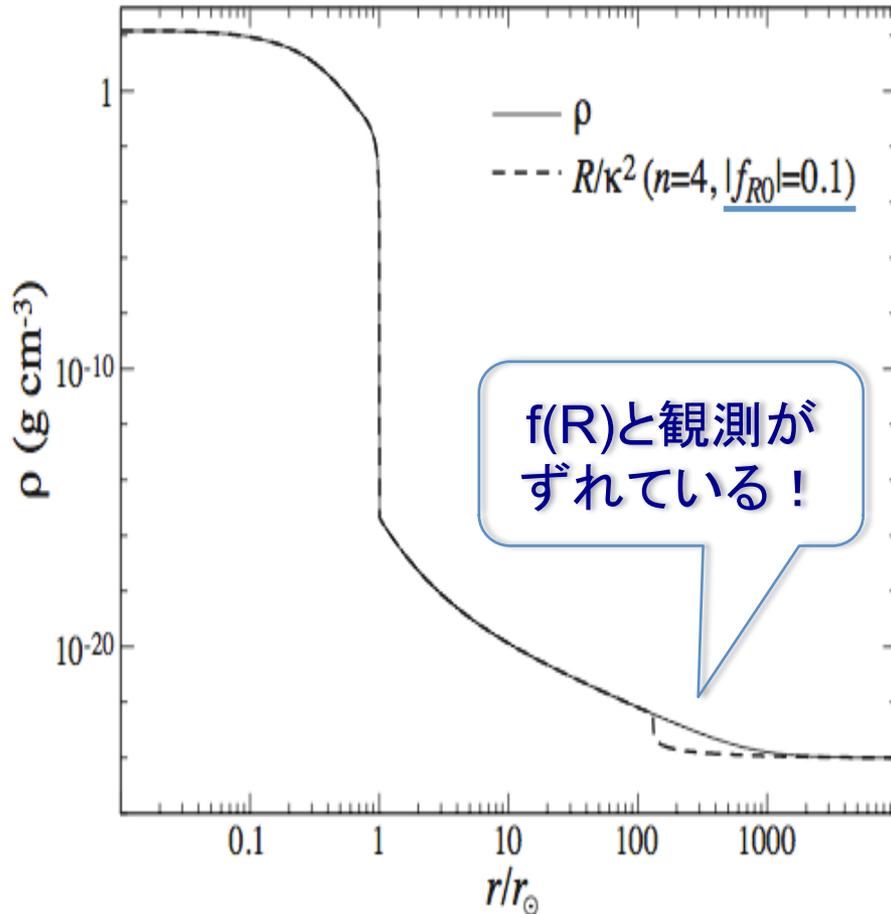


図4 太陽近傍の密度分布

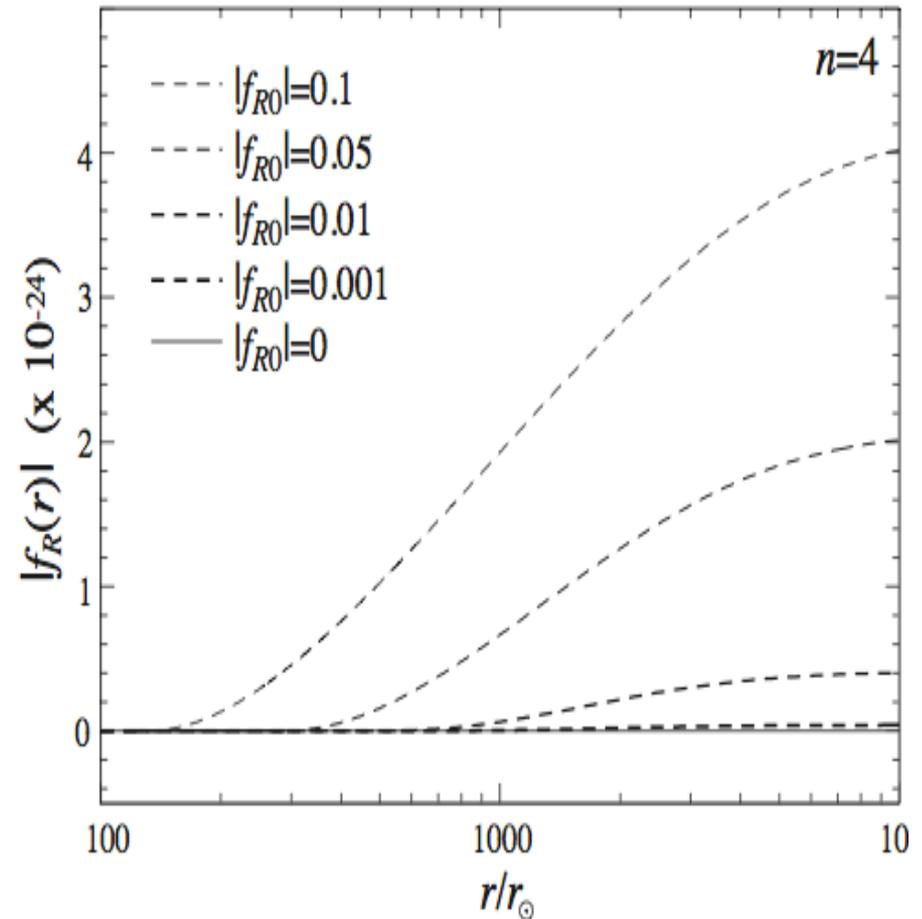


図5 $f_R(r) \times 10^{(-24)}$

☺より小さな $|f_{R0}|$ がGRに近似される。

局所スケール(銀河)

- ・ 銀河のスケールで考える。

観測的制限

+ 銀河を背景時空とみなす

$$|f_{R0}| < 74 (1.23 \times 10^6)^{n-1} \left[\frac{R_0 \Omega_m h^2}{m^2 0.13} \right]^{-(n+1)}$$

↑ より小さなn!

- ・ ハローの密度プロファイル

NFWプロファイル

+ 質量分布が満たす条件式

$$|f_{R0}| \lesssim 2 \times 10^{-6} \left(\frac{v_{\max}}{300 \text{ km/s}} \right)^2$$

- ・ HSモデルは、局所的なスケールでも

観測にあうようにパラメーターを選ぶことが出来る

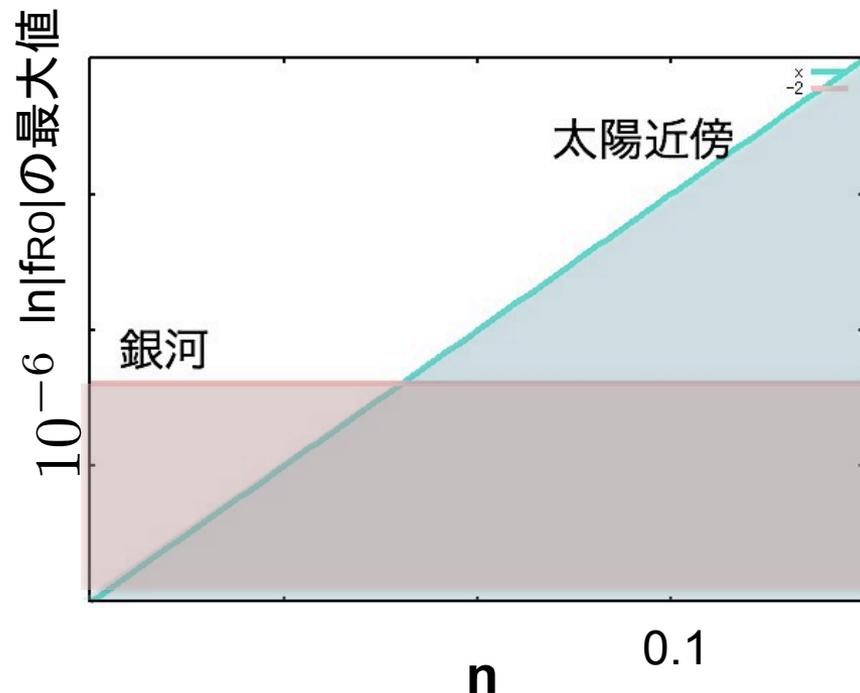


図6 f_{R0} の最大値の比較
(銀河スケール vs 太陽近傍)

f(R)とGRは区別できるのか？

- 有効状態方程式より...

$W_{\text{eff}} < -1$ になる領域がある!

...GRでは負の運動エネルギーに対応

- パワースペクトルより...

ずれが起こる!

この2点は、

GRとf(R)を

区別する手がかり!!

$$w = \frac{\dot{\phi}^2/2 - V}{\dot{\phi}^2/2 + V}$$

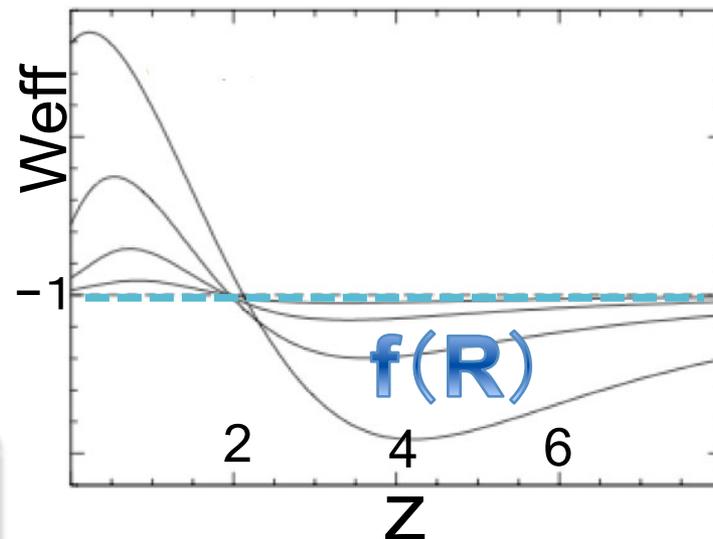


図8 有効状態方程式

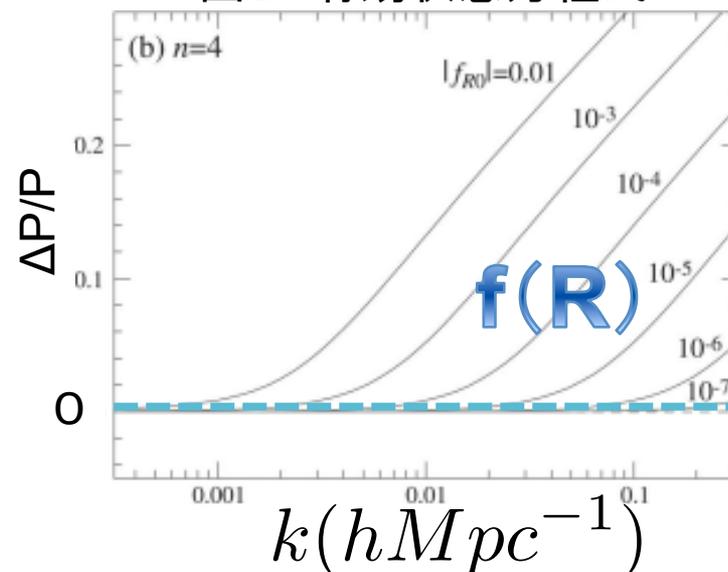


図8 パワースペクトルのずれ

まとめ

Hu, W., Sawicki, I. 2007, Phys. rev. D, 76, 064004,
arXiv:0705.1158v1[astro-ph]

★モチベーション: 宇宙の加速膨張を宇宙定数なしで説明したい

⇒Hu&Sawicki model

$$f(R) = -m^2 \frac{c_1 (R/m^2)^n}{c_2 (R/m^2)^n + 1}$$

- ☺ 観測に合うような加速膨張を記述できる。
- ☺ 局所スケールにおいて、(制限されたパラメータ領域で)
HSmodelはGRと同じくらい宇宙をよく記述！
- ☺ 将来、 $f(R)$ とGRを区別できるかもしれない!!
⇒ $W_{\text{eff}} < -1$, $\Delta P/P$ のGRからのずれ

ご清聴ありがとうございました！