

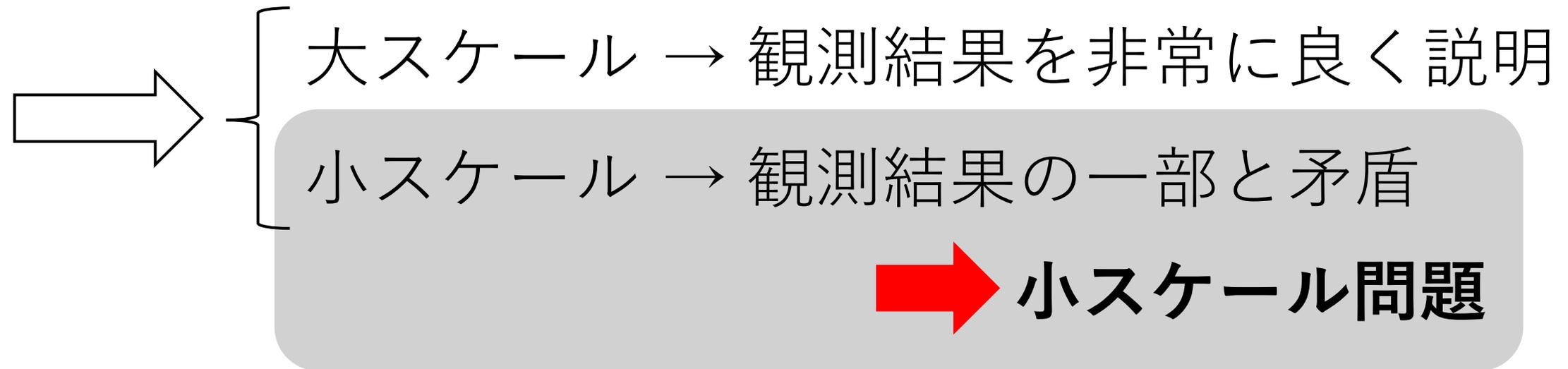
弱い重力レンズ効果を用いた 銀河中心部のダークマター密度分布解析

千葉大学宇宙物理学研究室 B4 藤川百花

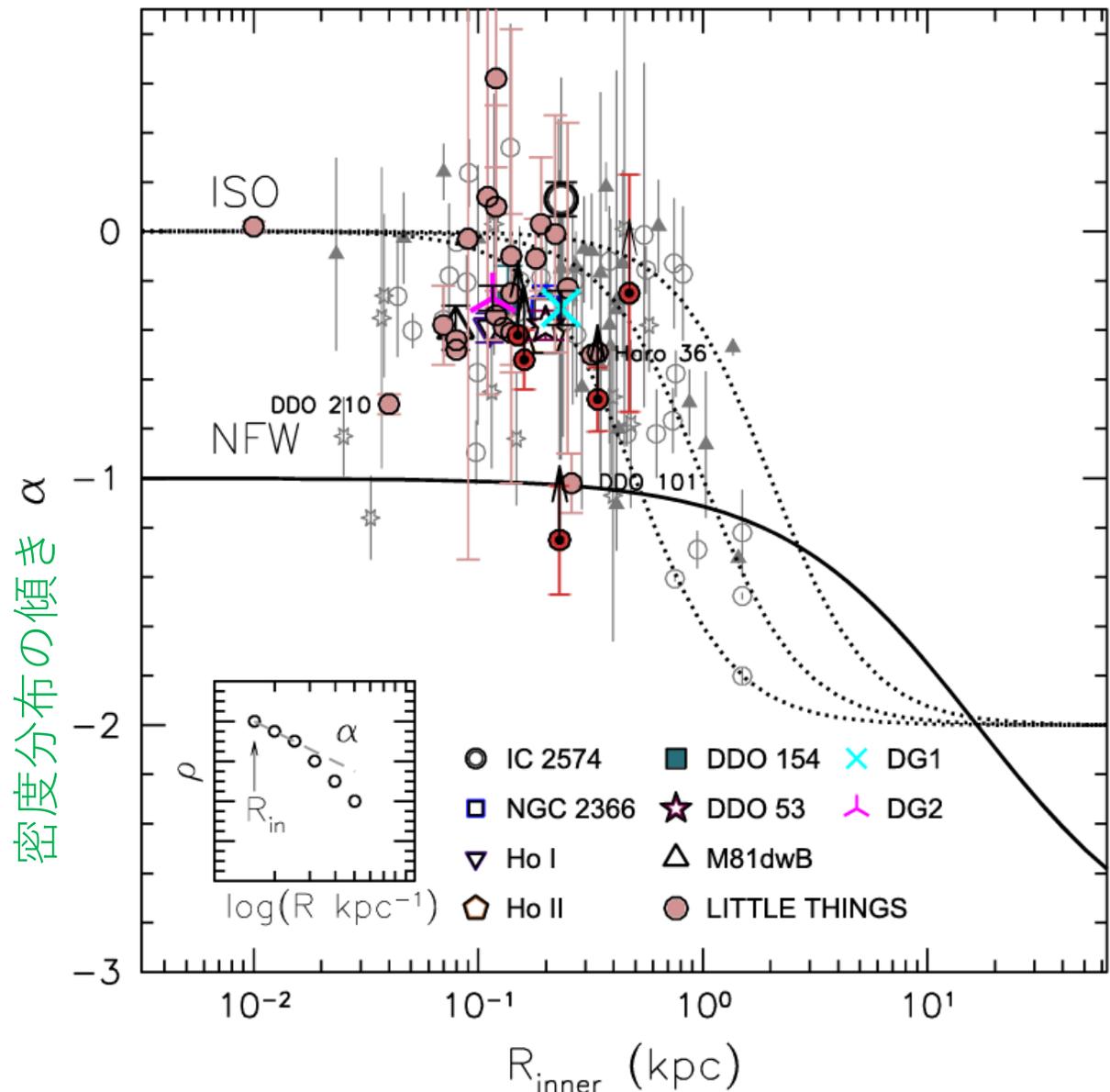
標準宇宙モデルと小スケール問題

冷たいダークマター (Cold Dark Matter, CDM)

- 重力以外の相互作用 ×
- 無衝突減衰 ×



コア・カスプ問題



ハロー中心部で、

- CDMハロー

Navarro-Frenk-White (NFW)

$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}$$

➡ カスプ状 ($\rho \propto r^{-1}, \alpha = -1$)

- 観測

➡ コア状 ($\rho = \text{const.}, \alpha \cong 0$)

ハロー中心からの距離 Oh et al. (2015)

小スケール問題の解決

1. バリオン物理の考慮

e.g. 星形成

超新星爆発

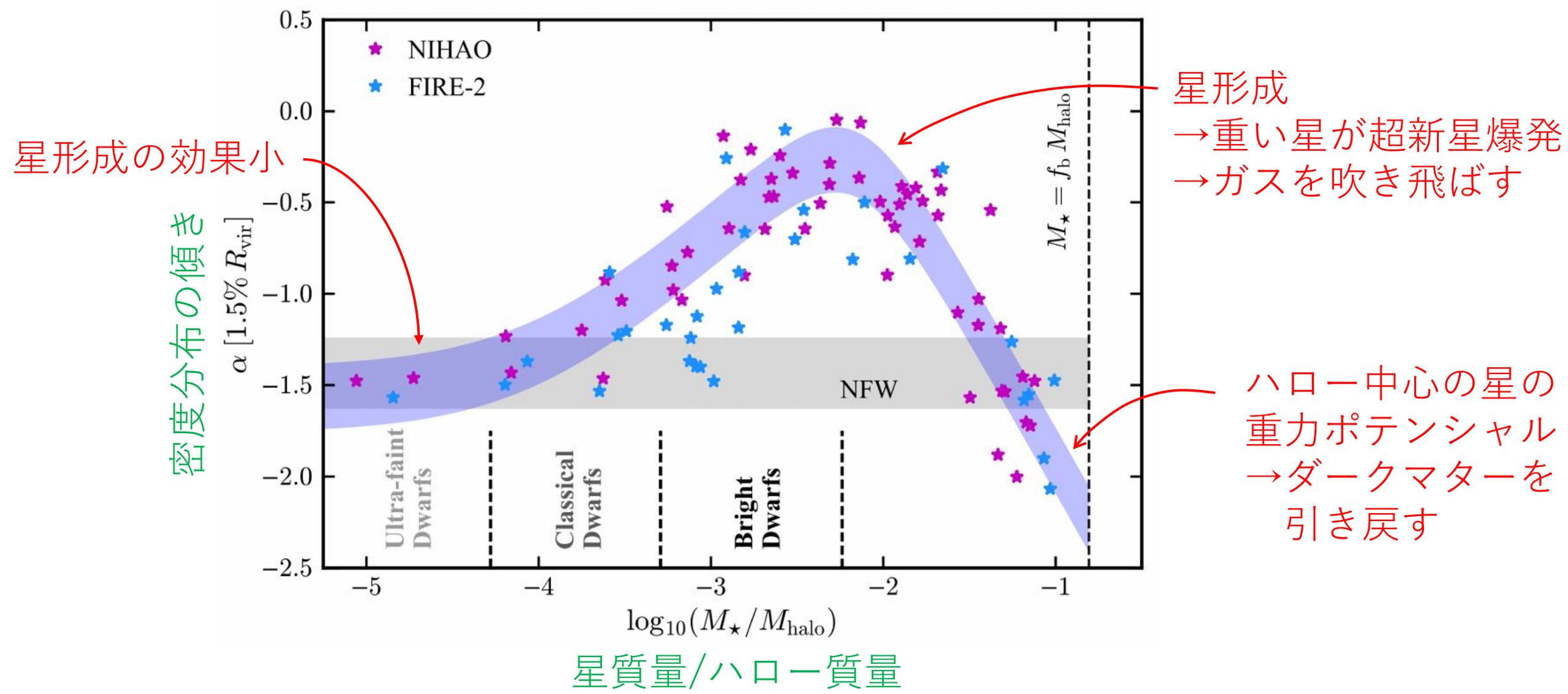
2. CDMに代わるダークマターモデルの導入

e.g. 温かいダークマター (Warm Dark Matter, WDM)

自己相互作用ダークマター (Self Interacting Dark Matter, SIDM)

軽いダークマター (Fuzzy Dark Matter, FDM)

1. バリオン物理の考慮



2. CDMに代わるダークマターモデルの導入

• Warm Dark Matter (WDM)

速度分散大



無衝突減衰



小スケール構造形成抑制

• Self Interacting Dark Matter (SIDM)

相互作用大



散乱による粒子の熱交換



等温密度プロファイル(中心コア状)

• Fuzzy Dark Matter (FDM)

質量小 → ド・ブロイ波長大 →

小スケール構造形成抑制
コア状中心密度プロファイル

研究の動機

- **先行研究**

 - 速度分散 (Binney and Tremaine, 2008)

 - 強い重力レンズ (Treu, 2010 / Oguri et al., 2014)

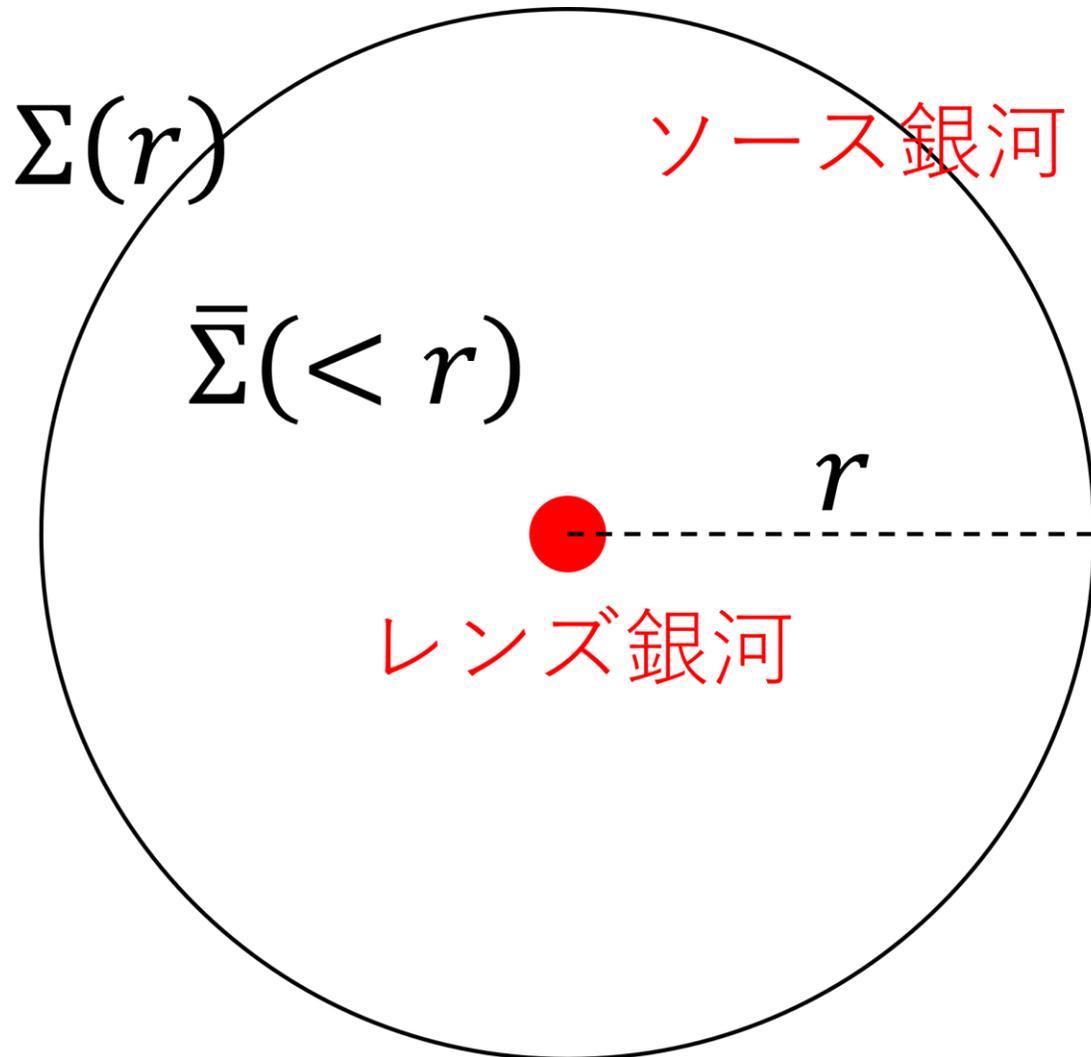
 - ➡ 銀河中心部のダークマター密度分布

- **観測技術**の発展

 - ➡ 弱い重力レンズ効果でも銀河中心部の密度分布が測定可能に

- 弱い重力レンズは速度分散や強い重力レンズより外側を調査するので**相補的**

弱い重力レンズ効果



質量面密度 $\Sigma(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\mathbf{r}) dZ$

接線歪み場 γ_t の測定



差分質量面密度

$$\begin{aligned} \Delta\Sigma(r) &= \gamma_t \times \Sigma_{cr} \\ &= \bar{\Sigma}(< r) - \Sigma(r) \end{aligned}$$

(Σ_{cr} : 臨界質量面密度)

個々の信号は小さい \rightarrow 多数のレンズ銀河について足し合わせる

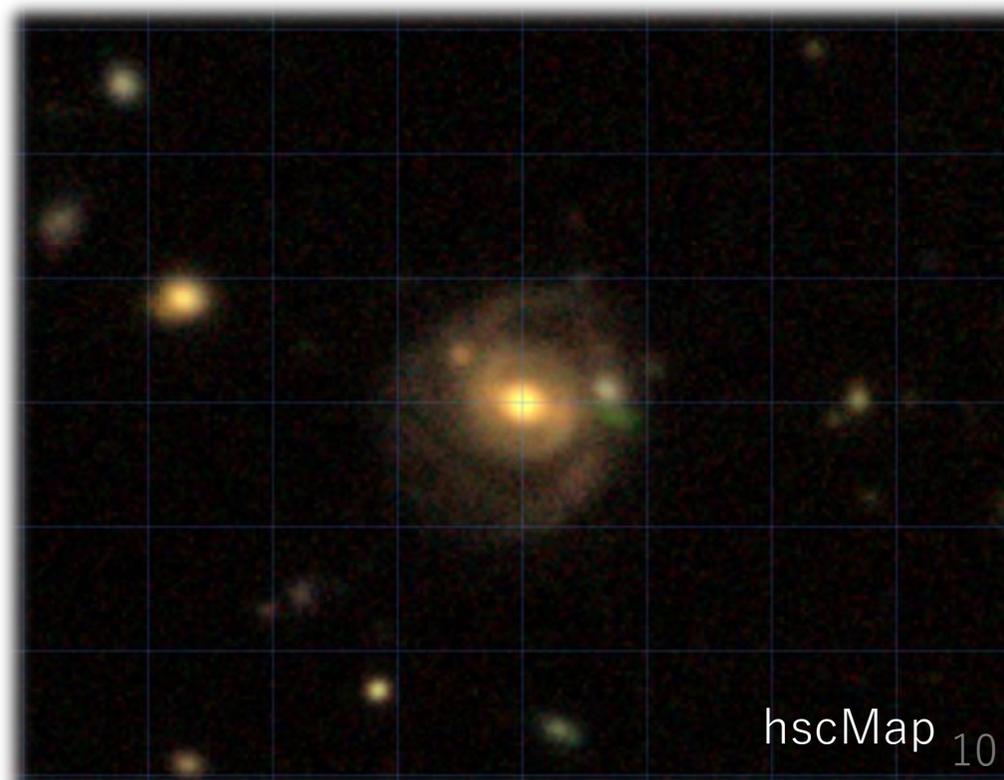
今回使用したデータ

●銀河形状サンプル

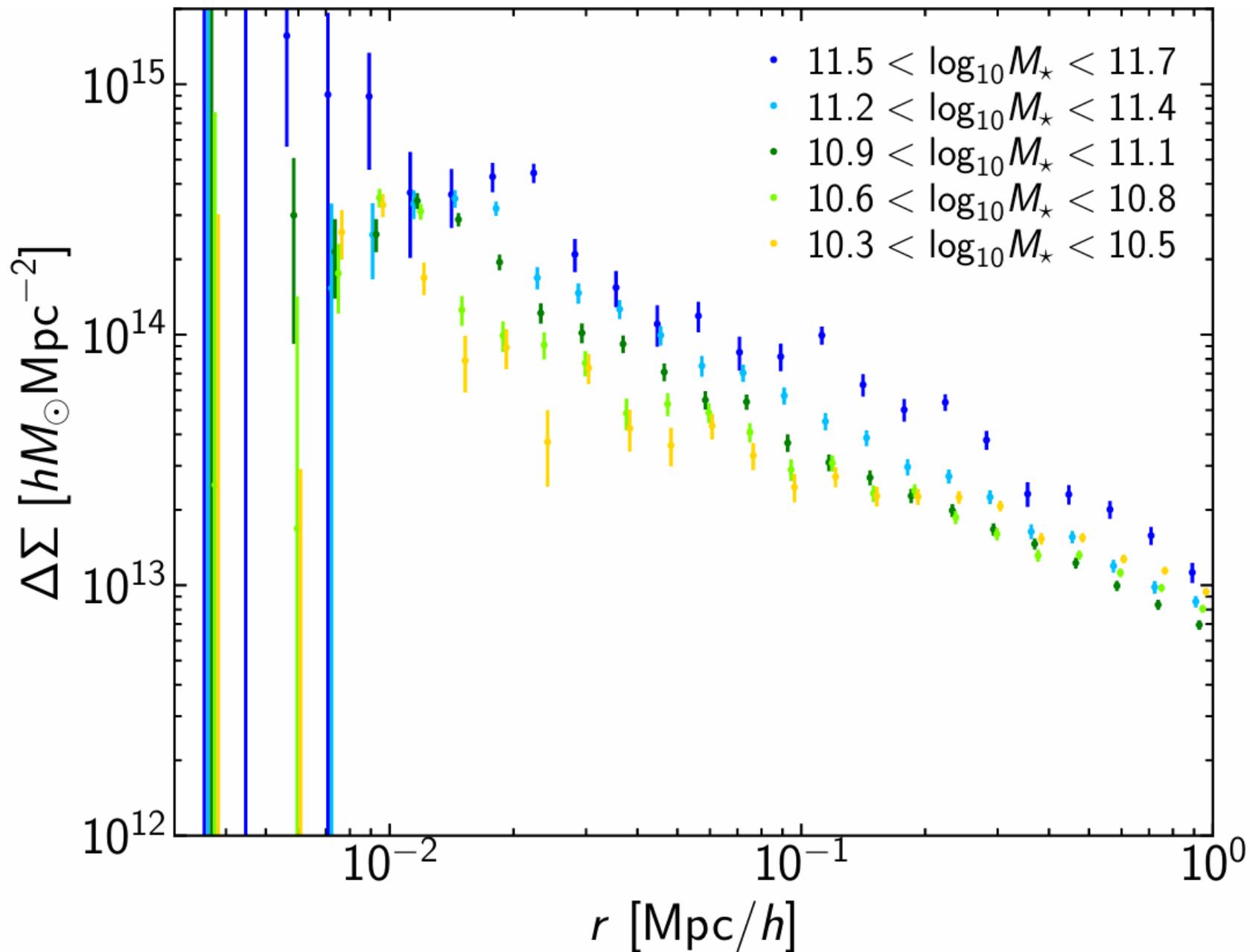
- ・ すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC)サーベイS21a (Li et al., 2022)
- ・ 3600万個

●レンズ銀河

- ・ photometric Luminous Red Galaxy (LRG) (Oguri et al., 2018)
 - ・ $0.4 < z < 0.6$
 - ・ $10^{10.3} M_{\odot} < M_{\star} < 10^{10.5} M_{\odot}$ (138120個)
 - ・ $10^{10.6} M_{\odot} < M_{\star} < 10^{10.8} M_{\odot}$ (175178個)
 - ・ $10^{10.9} M_{\odot} < M_{\star} < 10^{11.1} M_{\odot}$ (168589個)
 - ・ $10^{11.2} M_{\odot} < M_{\star} < 10^{11.4} M_{\odot}$ (83680個)
 - ・ $10^{11.5} M_{\odot} < M_{\star} < 10^{10.7} M_{\odot}$ (13386個)
- (M_{\star} : 星質量)



結果



• $M_{\star} \uparrow \rightarrow \Delta\Sigma \uparrow$

• $r \downarrow \rightarrow$ 誤差 \uparrow

フィット

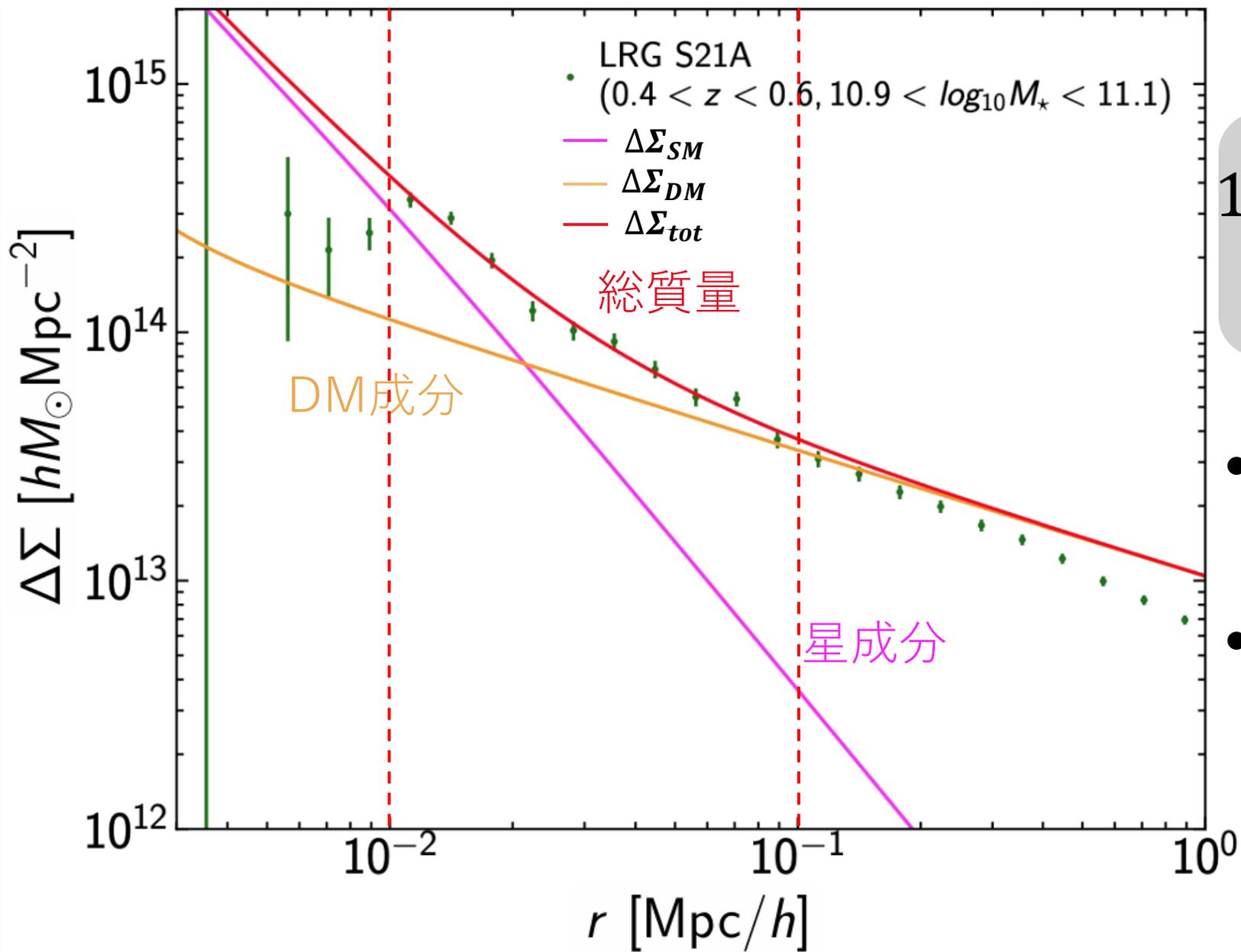
- 星質量(SM)成分 → Hernquist (パラメータ M_* , r_e)
- ダークマター(DM)成分 → power-law

$$M_{DM}(< r) = M_* A_{DM} \left(\frac{r}{r_e} \right)^{3+\gamma_{DM}} \quad M_{DM}(< r) = \int_0^r 2\pi r \Sigma_{DM}(r) dr$$

$$\bar{\Sigma}_{DM}(< r) = \frac{M_{DM}(< r)}{\pi r^2} \quad \Sigma_{DM}(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{dM_{DM}(< r)}{dr}$$

$$\Delta\Sigma_{DM} = \bar{\Sigma}_{DM}(< r) - \Sigma_{DM}(r)$$

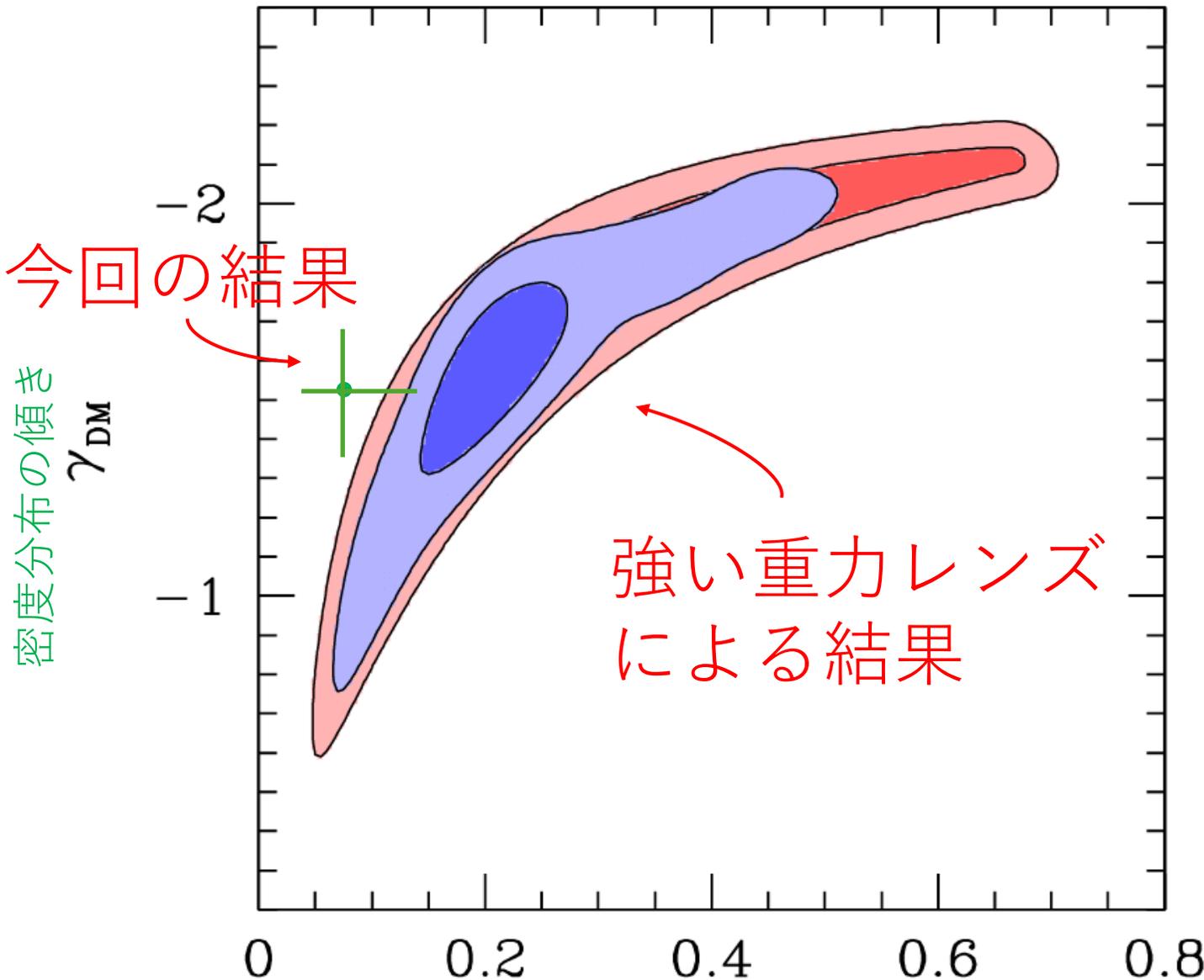
➡ 総質量 $\Sigma_{tot} = \Sigma_{SM} + \Sigma_{DM}$



$10^{-2} < r [\text{Mpc}/h] < 10^{-1}$
 でフィット

- 中心付近
 → SM成分の寄与大
- 中心から離れる
 → DM成分の寄与大

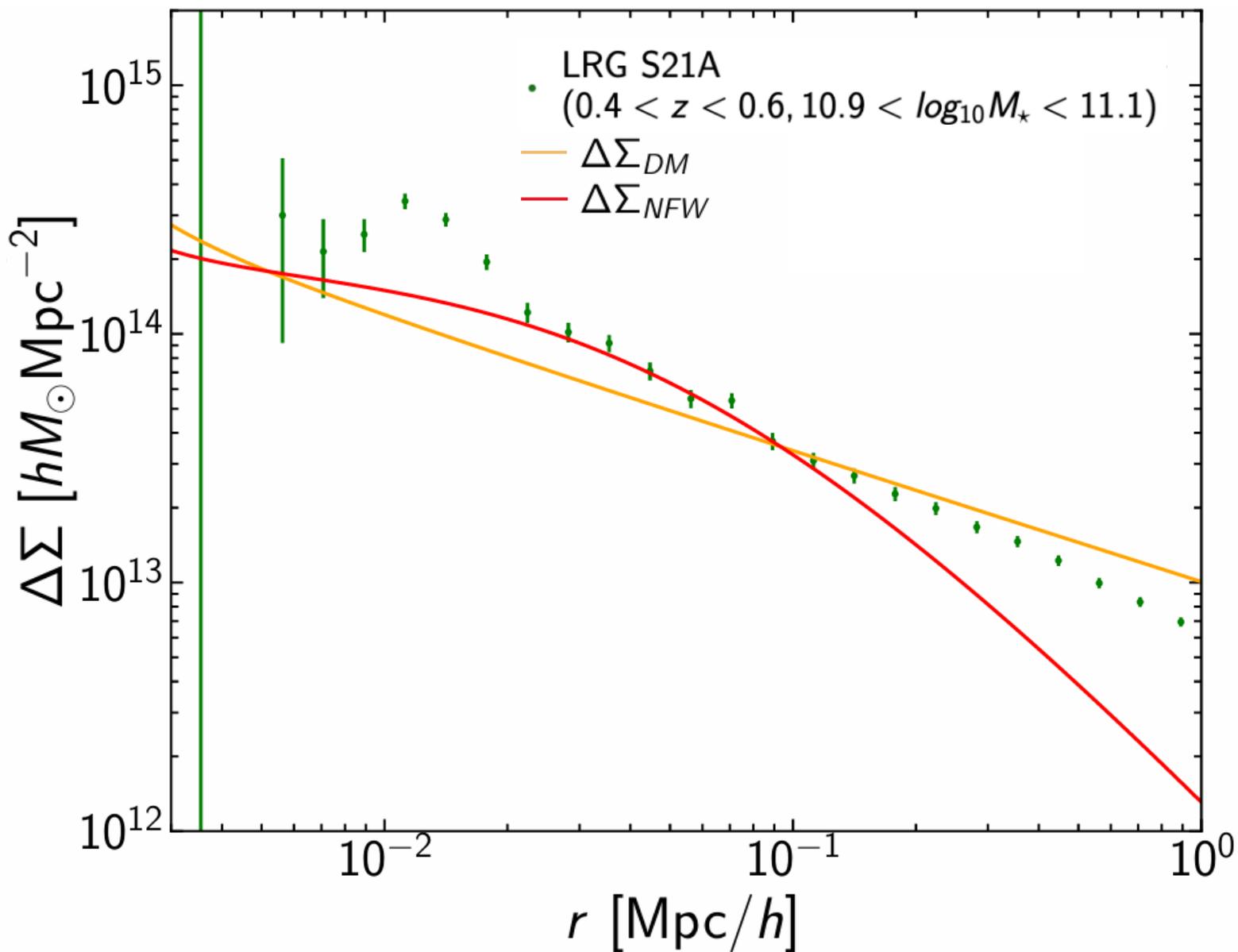
強い重力レンズ効果による結果との比較



$$\gamma_{DM} = -1.52^{+0.16}_{-0.17}$$
$$A_{DM} = 0.073^{+0.065}_{-0.026}$$

- 誤差の範囲内で一致

NFWとの比較



M_{\star}

SMHM関係

Abe et al. (2025)

Behroozi et al. (2019)

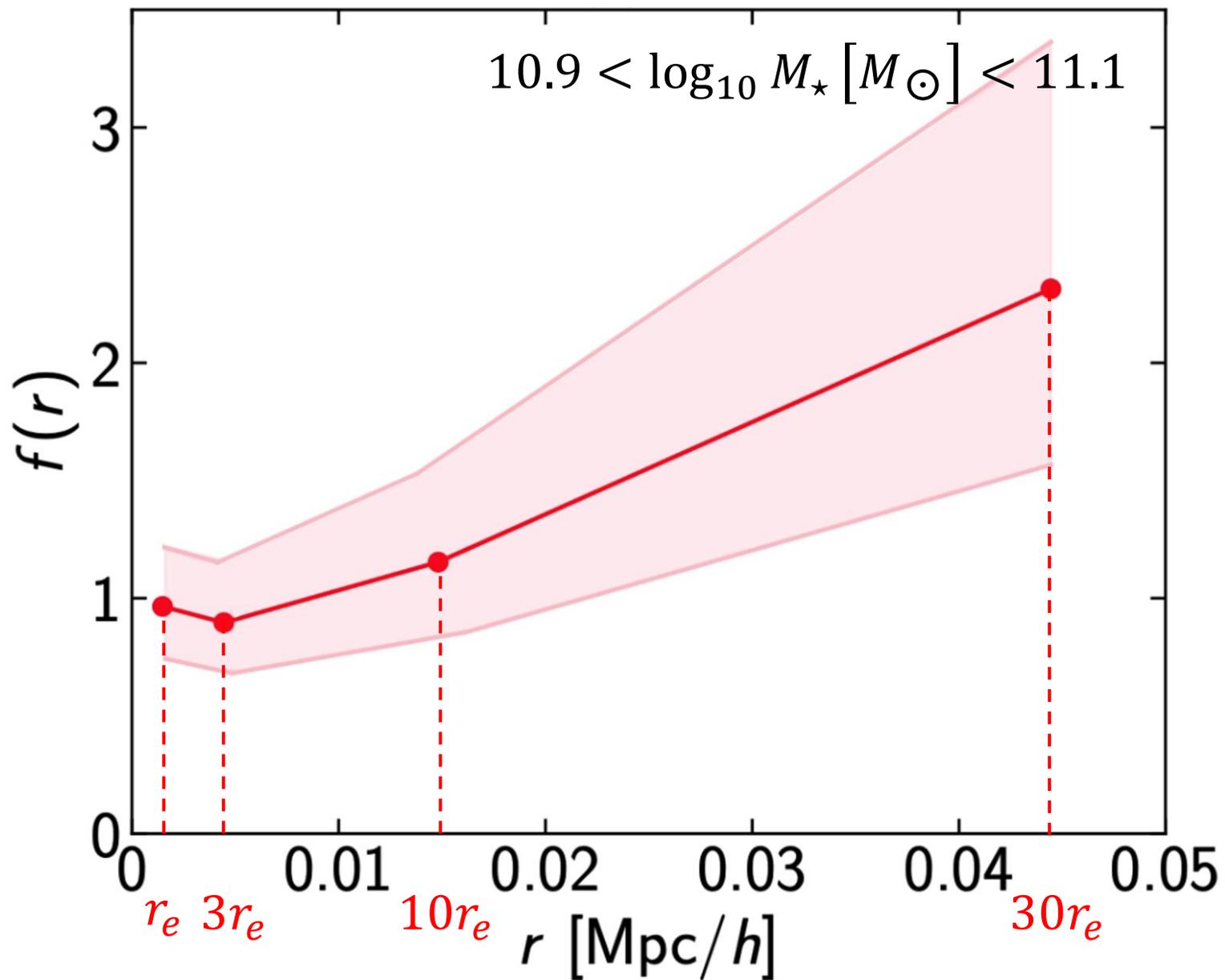
M_{halo}



$\Delta\Sigma_{NFW}$

フィットした $\Delta\Sigma_{DM}$ は
 $\Delta\Sigma_{NFW}$ と不一致

$f(r) = \frac{\Sigma_{DM}(r)}{\Sigma_{NFW}(r)}$ を用いた考察

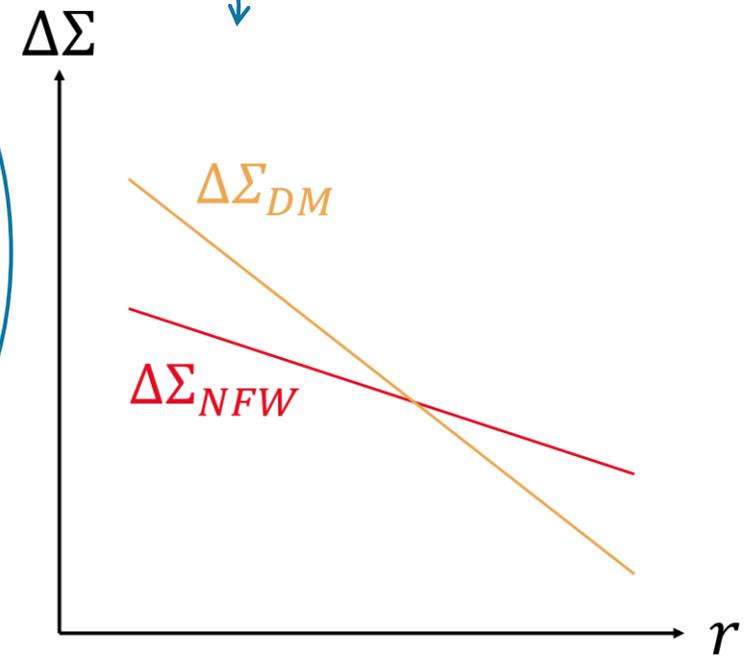
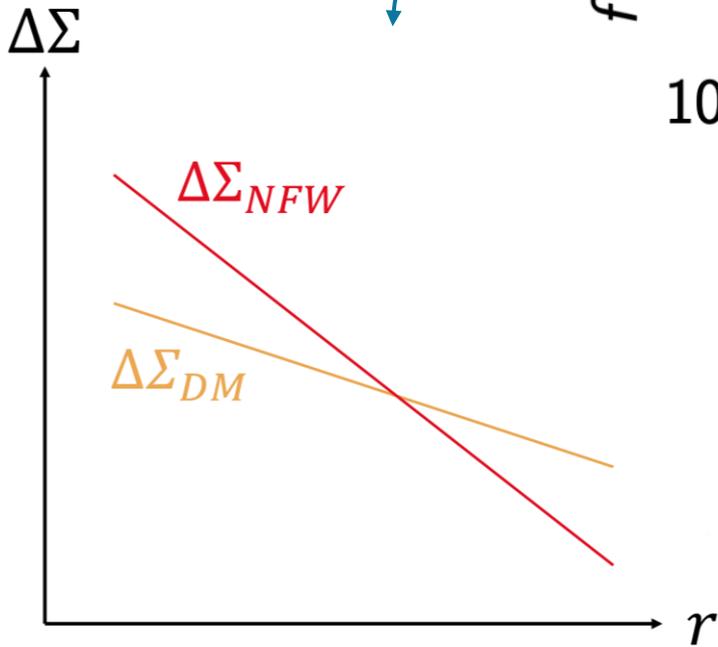
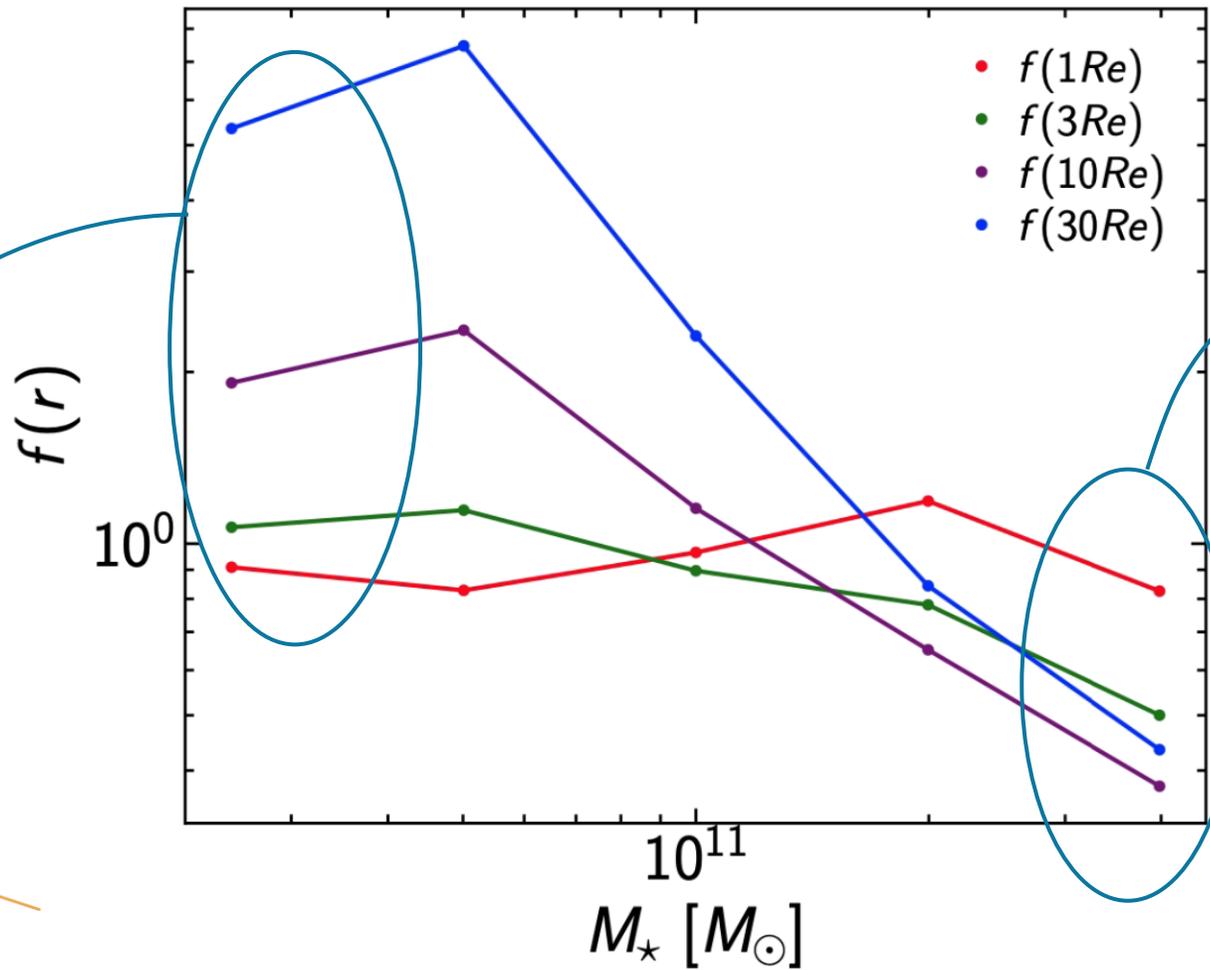


• $f(r)$ はほぼ単調増加

$$f(r) = \frac{\Sigma_{DM}(r)}{\Sigma_{NFW}(r)} \text{ の } M_{\star} \text{ 依存性}$$

M_{\star} が小さい銀河
 $f(r)$ 単調増加

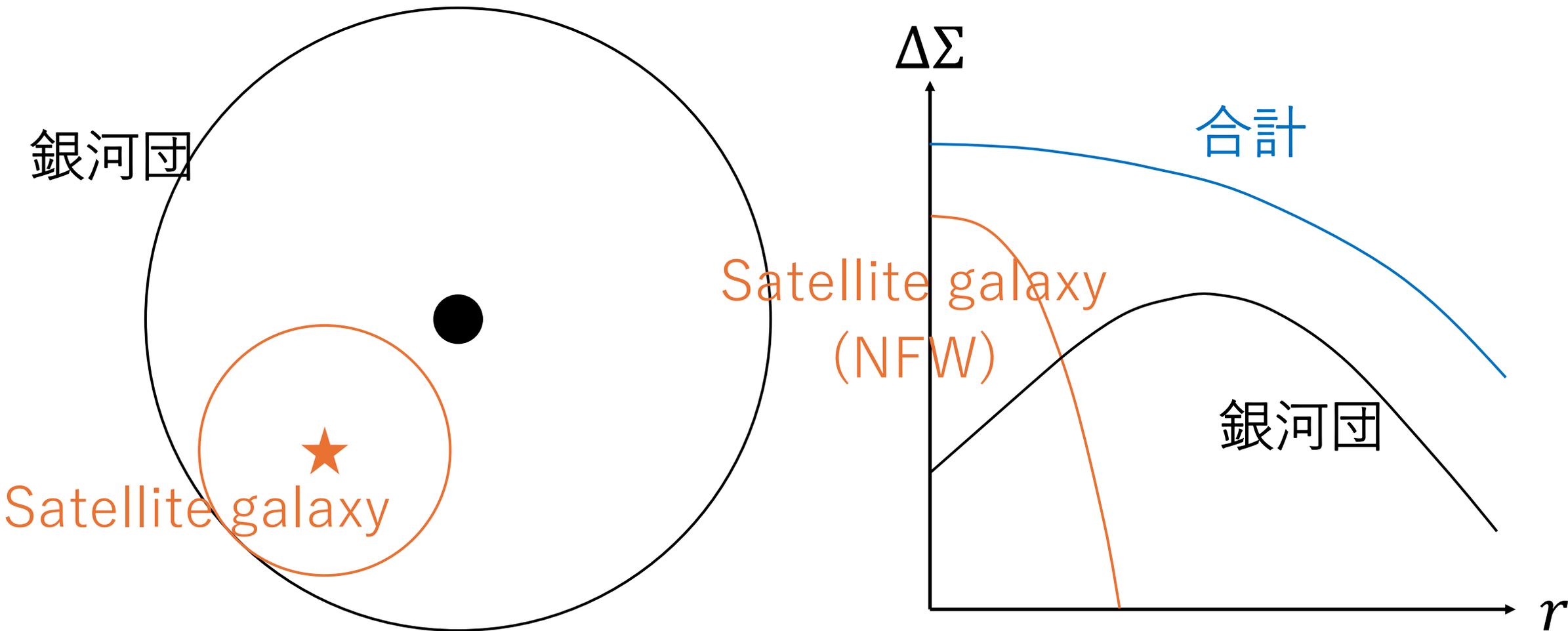
M_{\star} が大きい銀河
 $f(r)$ 単調減少



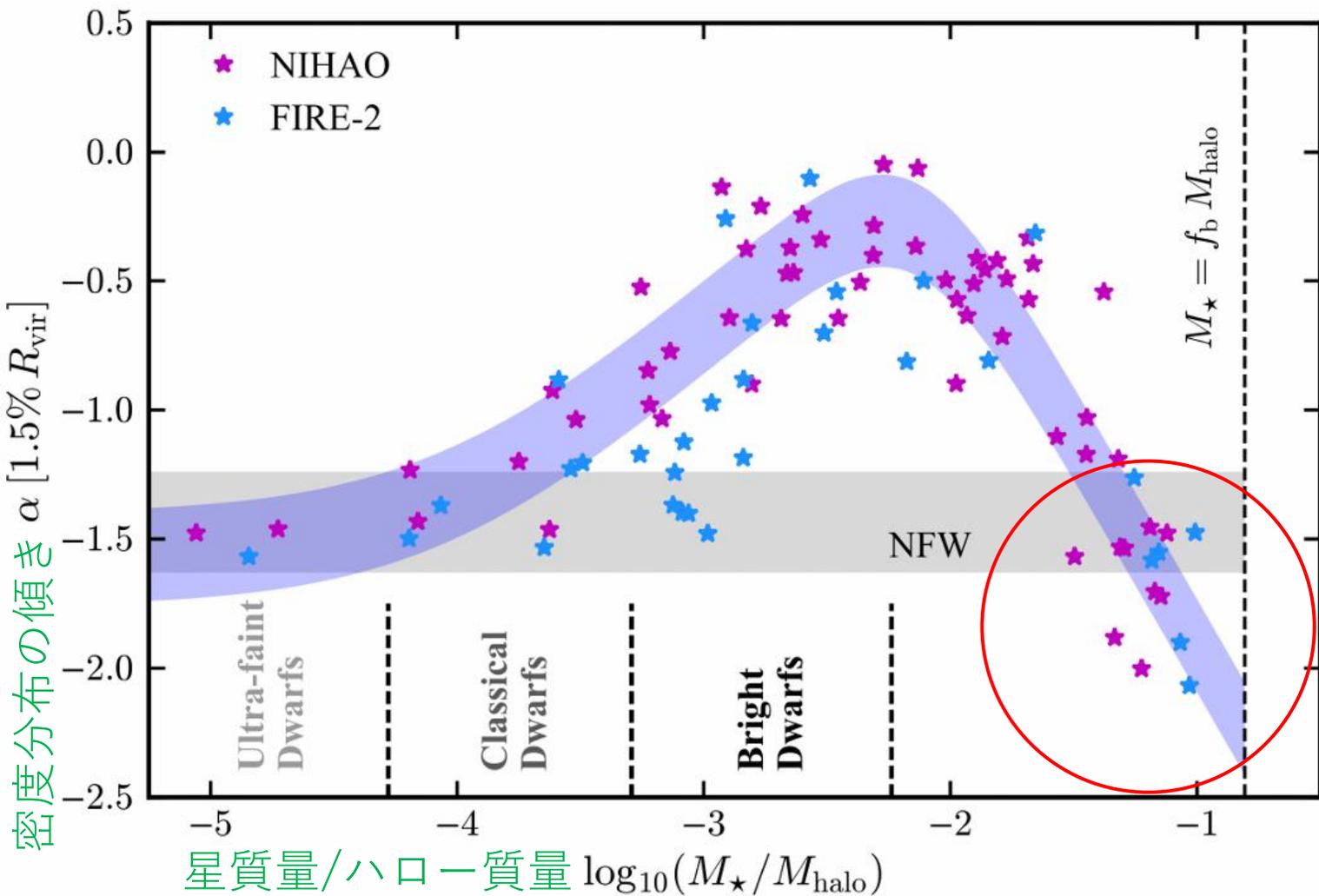
$\Delta\Sigma_{DM}$ は $\Delta\Sigma_{NFW}$ より緩やか

$\Delta\Sigma_{DM}$ は $\Delta\Sigma_{NFW}$ より急

M_* が小さい銀河 \rightarrow Satellite galaxy になりやすい



\rightarrow M_* が小さいとDM密度分布がNFWより緩やかになる



Bullock and Boylan-Kolchin (2017)

M_{\star} が大きい
↓
バリオンの
重力ポテンシャルが
深い
↓
DMが収縮
(Adiabatic Contraction)

➡ M_{\star} が大きいとDM密度分布がNFWより急になる

まとめと今後の展望

- 標準宇宙モデルが持つ小スケール問題解決のため、弱い重力レンズ効果を用いて銀河中心部のDM密度分布を解析した。
- 弱い重力レンズを使って、星質量が卓越し始める銀河中心部のDM密度分布を調べられることが実証できた。
- 強い重力レンズによる結果とは整合したが、バリオンや周辺銀河の影響によりNFWとは一致しなかった。
- 今後はモデルの見直し等によりDM密度分布への理解をより深める。