

暗黒物質サブハローの性質と 直接・間接検出実験への示唆

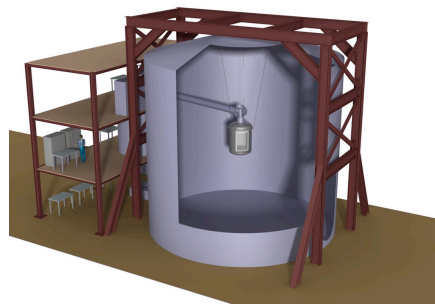
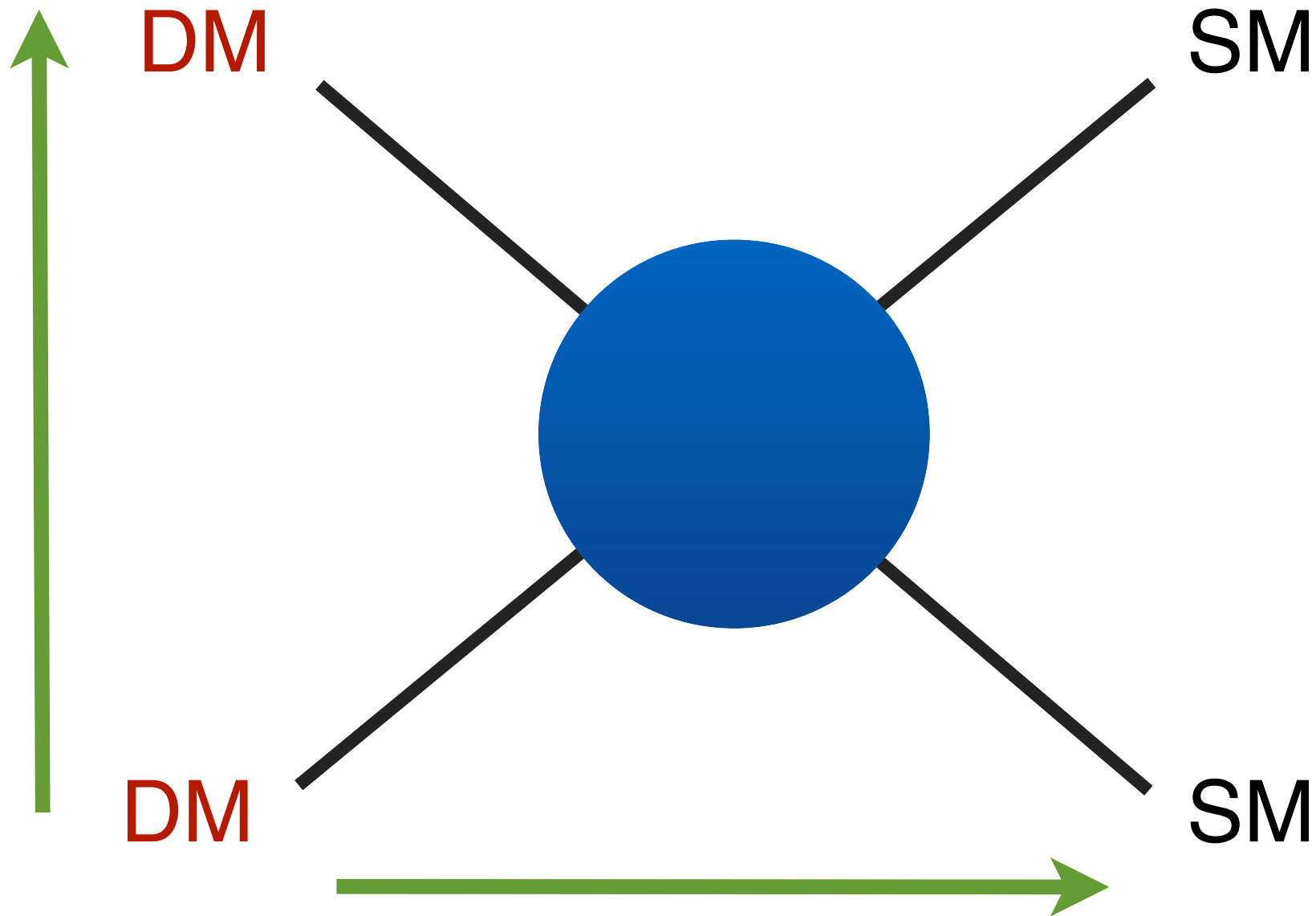
安藤真一郎

アムステルダム大学 / 東京大学

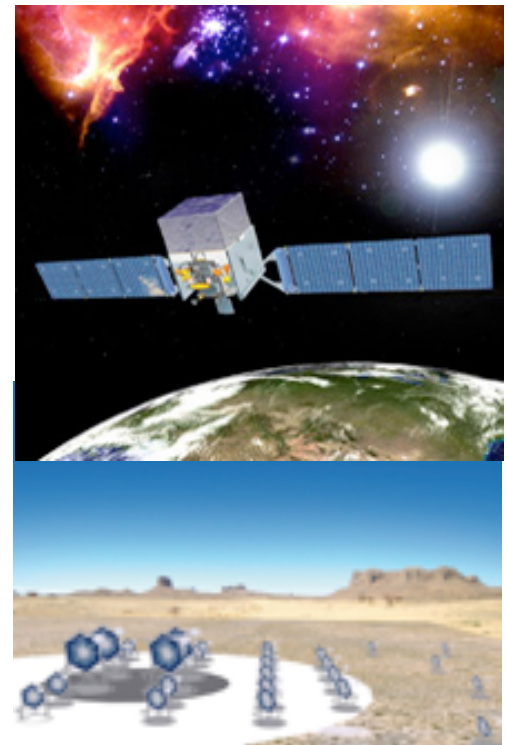
暗黒物質粒子発見への道のり



加速器による
粒子衝突実験
(LHCなど)



直接検出実験
(XENON, LUX
など)



間接検出実験
(Fermi, CTAなど)

暗黒物質密度の理解の重要性

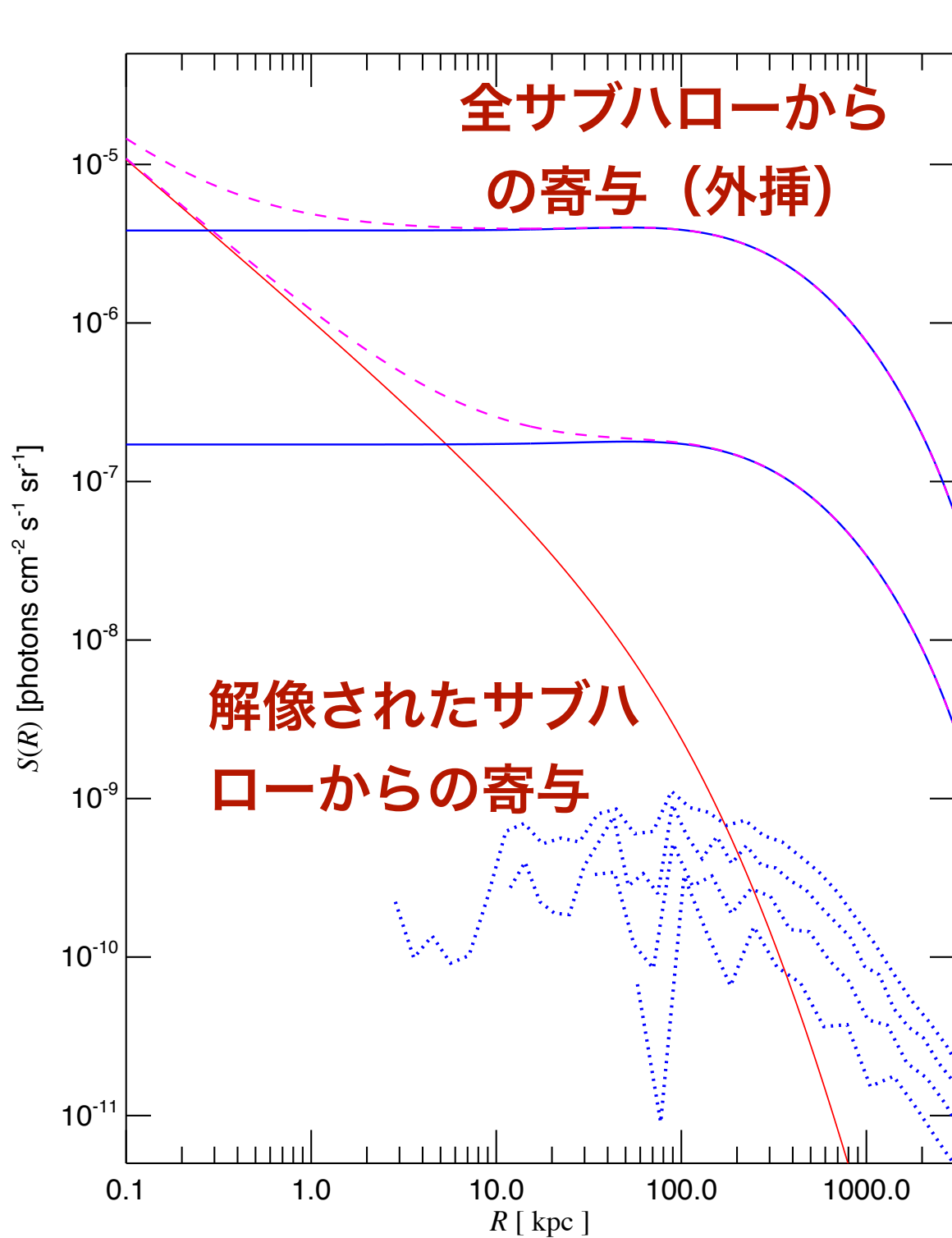
- 直接探査の検出レート $\propto \rho_{\text{DM}}$
- 間接探査の検出レート $\propto \rho_{\text{DM}}^2$ (対消滅)、 ρ_{DM} (崩壊)
- **暗黒物質の素粒子パラメータ** (質量、断面積等) を理解するにあたって、**暗黒物質粒子の密度分布を理解**することは極めて重要である

暗黒物質サブハロー

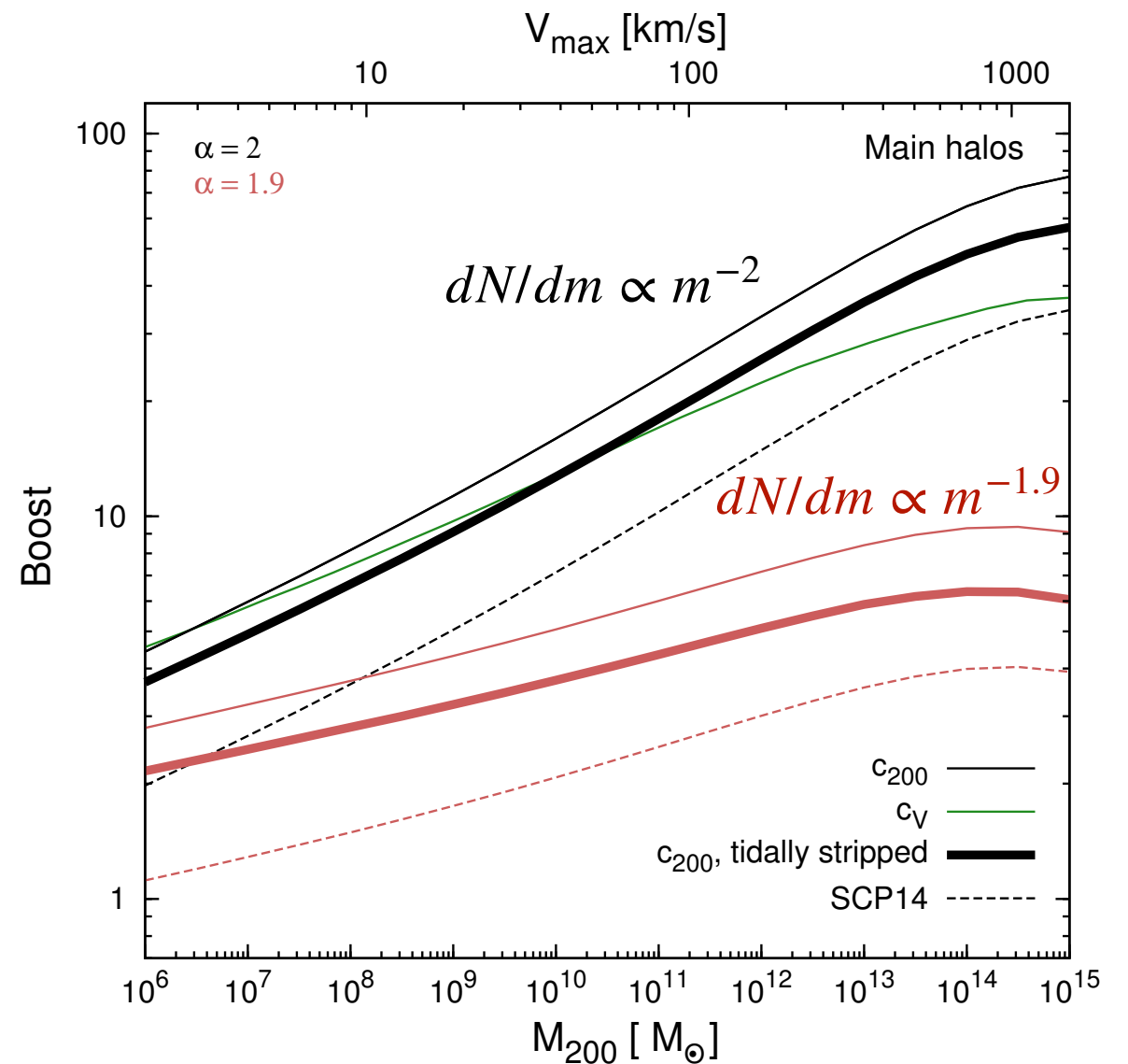
暗黒物質サブハロー

- 銀河など大きい暗黒物質ハローは、**無数のサブハロー**を有すると考えられている
 - 実際比較的大き目のサブハローは、矮小銀河として見つかっている
 - WIMP の場合最小サブハローの質量は地球サイズかそれ以下
- サブハローの存在により、暗黒物質対消滅の頻度が大きくなることが期待される (**対消滅ブースト**)
- 太陽系近傍にサブハローが存在した場合、**直接検出計画にも追い風**となる

対消滅ブースト



Gao et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **419**, 1721 (2012)



Moliné et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **466**, 4974 (2017)

- サブハローの寄与により、対消滅レートがファクター10から100程度まで大きくなることが指摘されている
- **しかし見積もりは極めて不定性が大きく、数値シミュレーションでの検証は不可能**

暗黒物質サブハローの解析モデル

Structures start to form



Smaller halos merge and accrete
to form larger ones



Subhalos experience mass loss

初期条件

原始パワースペクトル

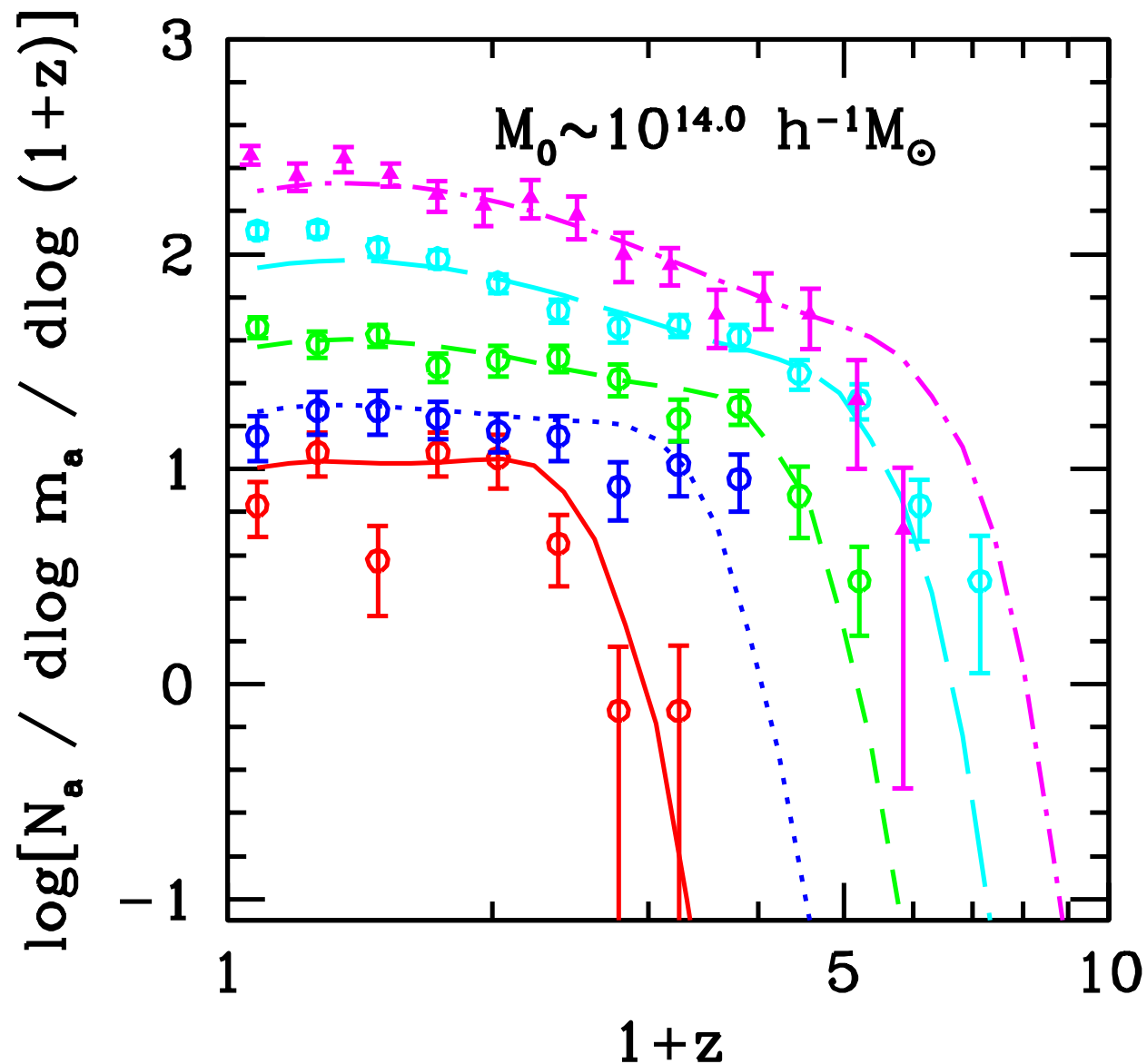
Extended Press-Schechter
定式

親ハローの潮汐力による密度
プロファイルの変化

サブハローの降着、進化

サブハローの降着質量分布

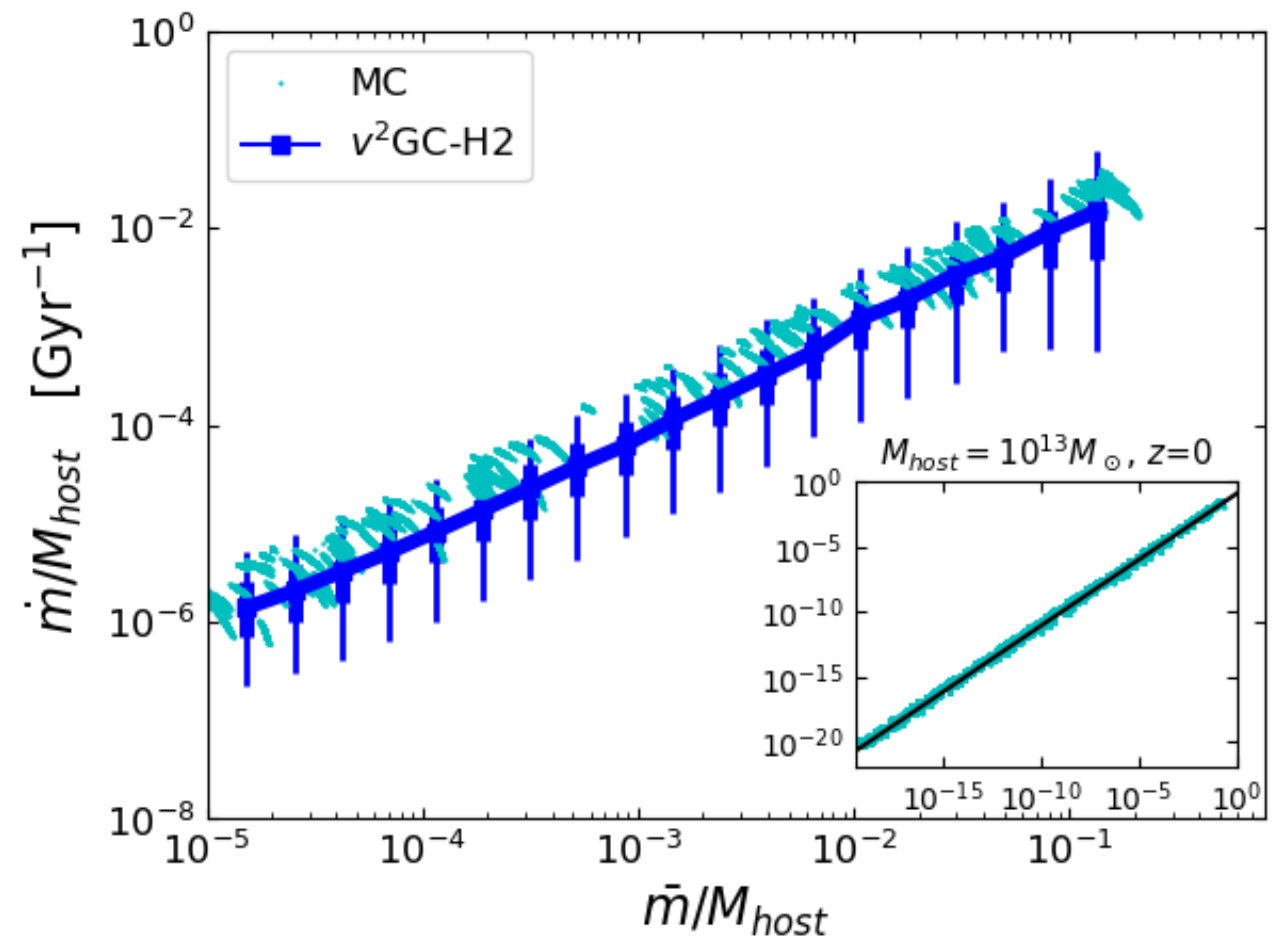
Extended Press-Schechter定式



Yang et al., *Astrophys. J.* **741**, 13, (2011)

降着後の潮汐進化のモデル化

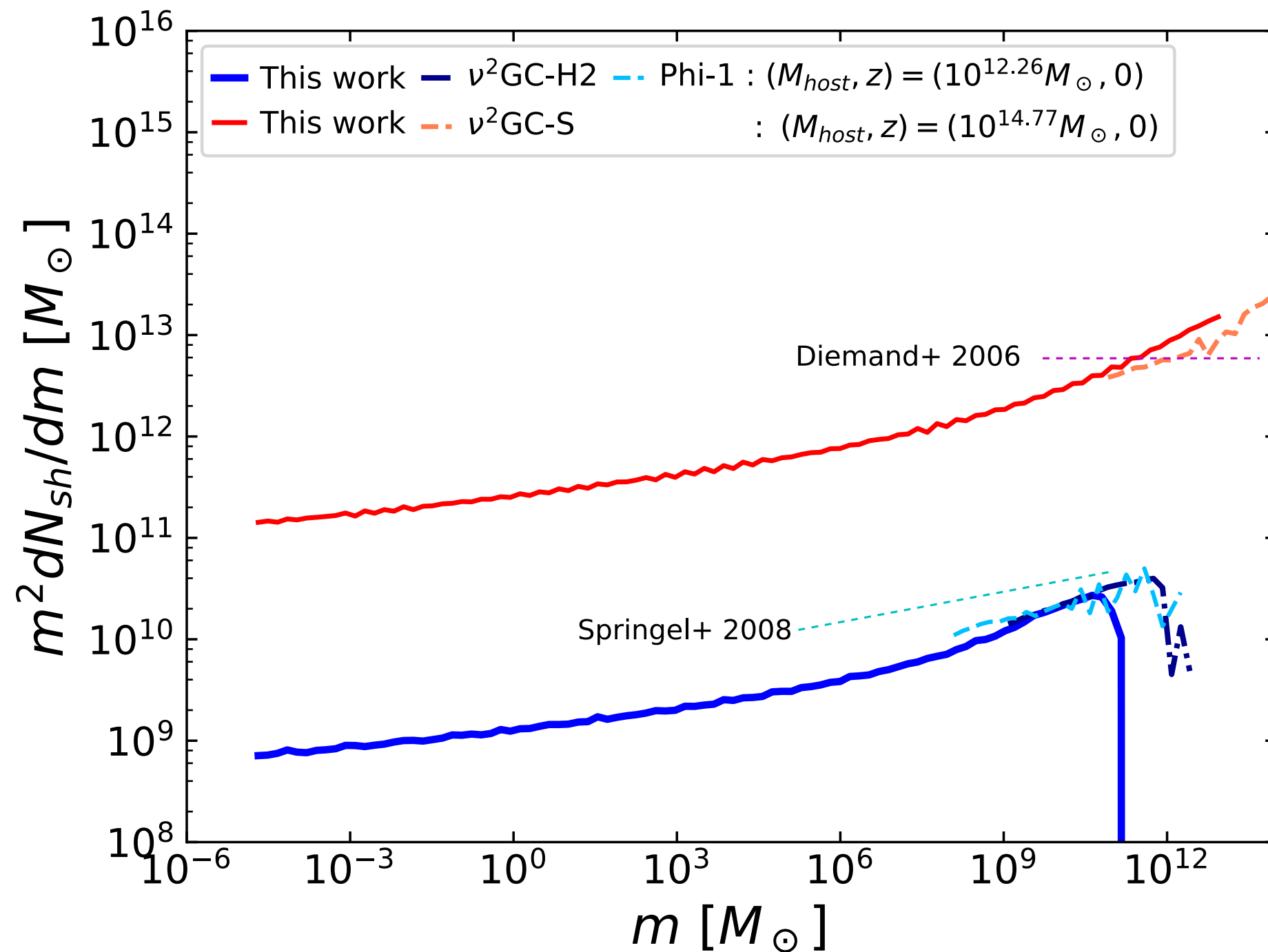
モンテカルロ法+シミュレーションとの比較



Hiroshima, Ando, Ishiyama, *Phys. Rev. D* **97**, 123002 (2018)

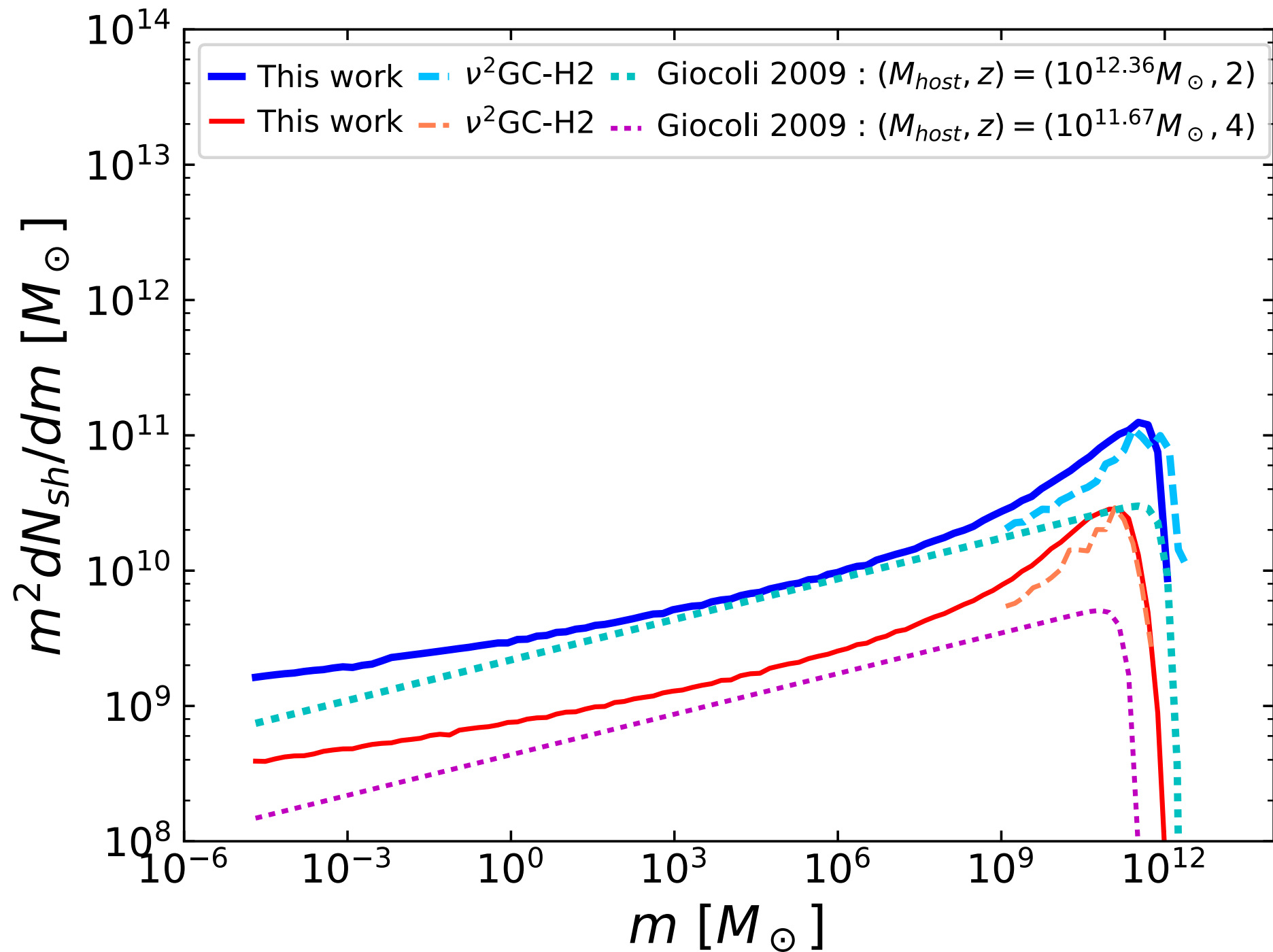
サブハロー質量関数

銀河団・銀河ハロー



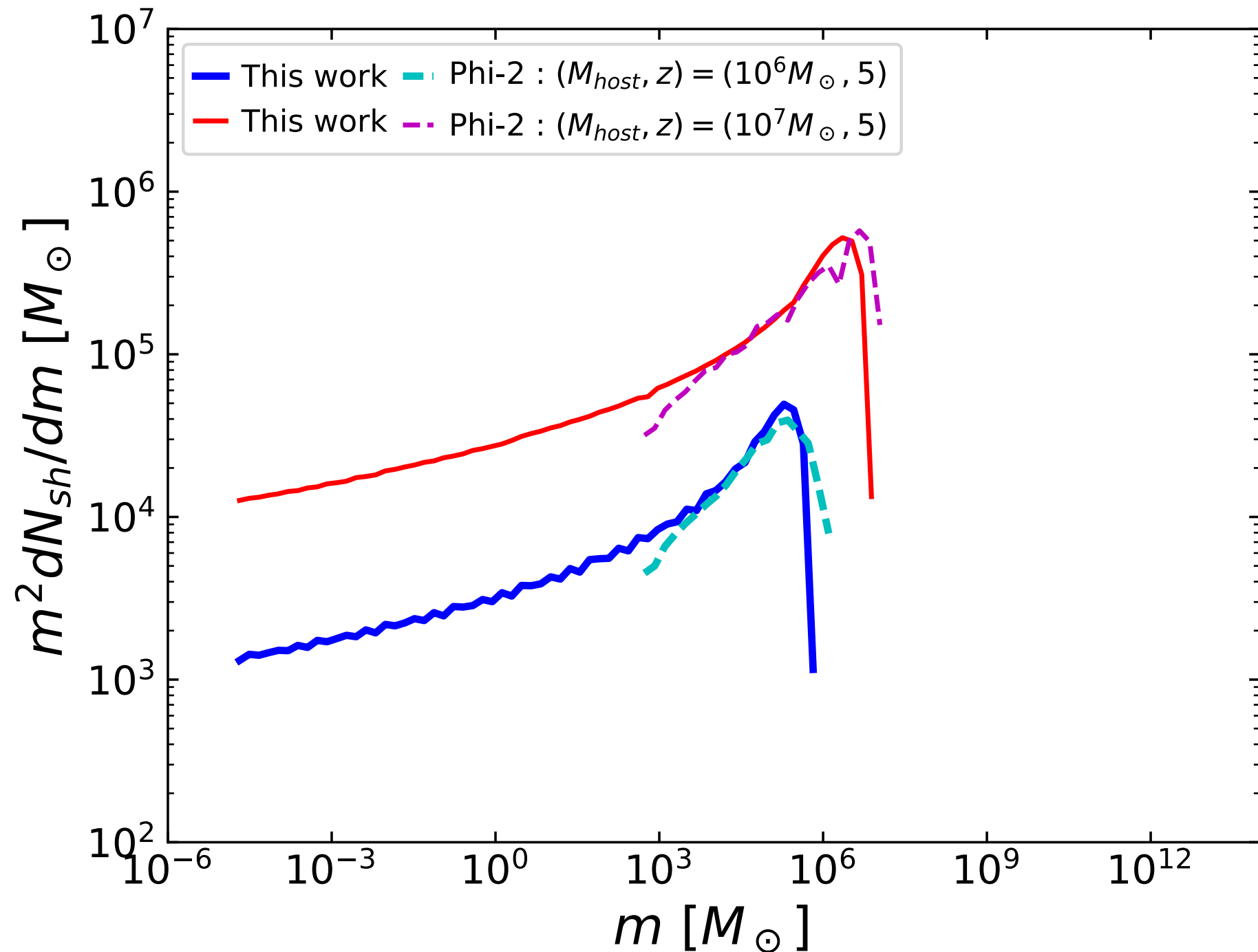
サブハロー質量関数

銀河ハロー @ $z=2,4$



サブハロー質量関数

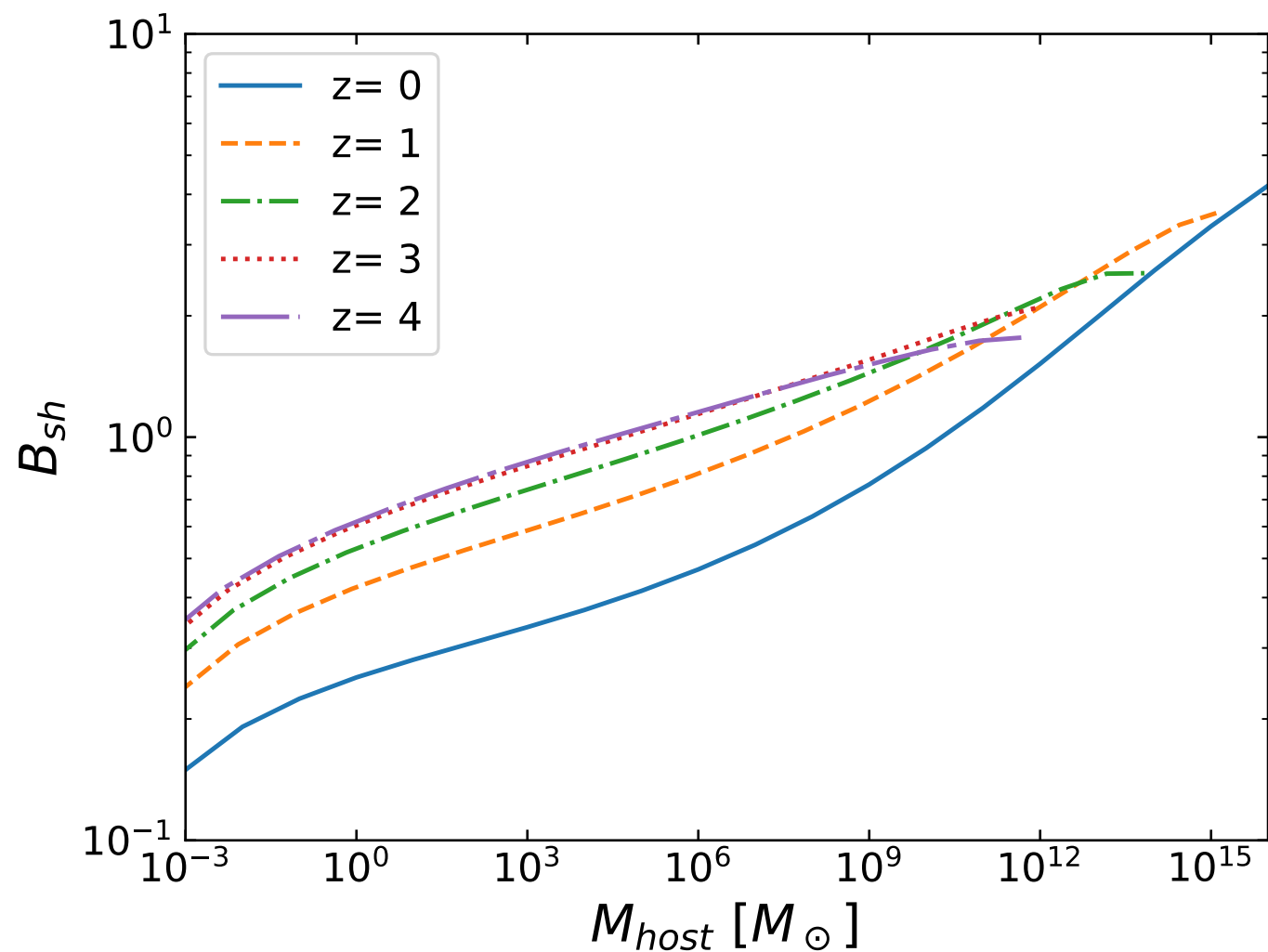
矮小銀河 @ $z=5$



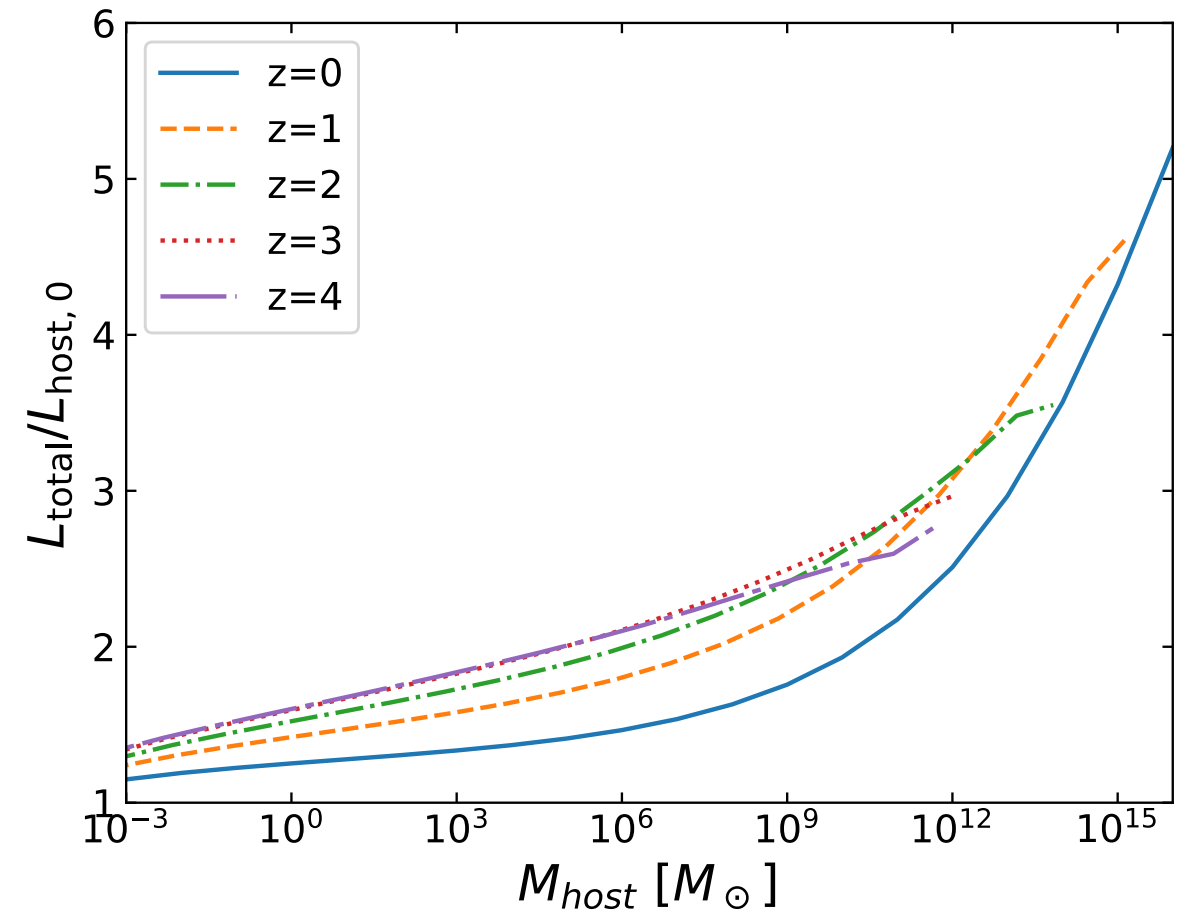
対消滅ブースト

Hiroshima, Ando, Ishiyama, *Phys. Rev. D* **97**, 123002 (2018)

Ando, Ishiyama, Hiroshima, *Galaxies* **7**, 68 (2019)



w/ up to **sub³-subhalos**



- サブハローによるブースト因子は銀河（銀河団）サイズの本ハローで ~ 1 (3) 程度
- 高赤方偏移で大きくなるが、 $z=1$ でほぼ飽和
- Laptopコンピュータでもひとつの (M, z) パラメータセットにつき**1分程度の時間で計算が可能**

矮小銀河における対 消滅に対する示唆

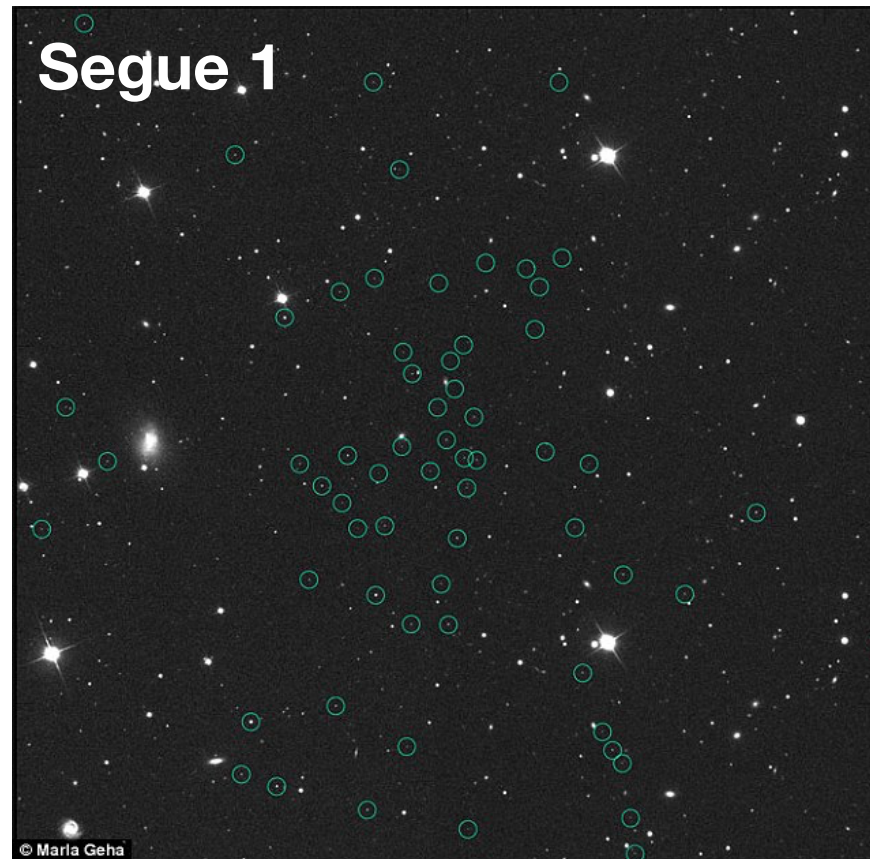
矮小銀河の “J factor”



$$J = \int d\Omega \int d\ell \rho^2(r(\ell, \Omega))$$

- 矮小銀河の密度プロファイルと Jファクターの見積もりは、系に所属する星の運動を観測することで行う
- 通常、最も有望な矮小銀河は $J \sim 10^{19} \text{ GeV}^2/\text{cm}^5$ より大きい Jファクターを持つと考えられてきた
- しかし、超低光度 (*ultrafaint*) 矮小銀河にはそもそも観測できる星の数がそれほどない

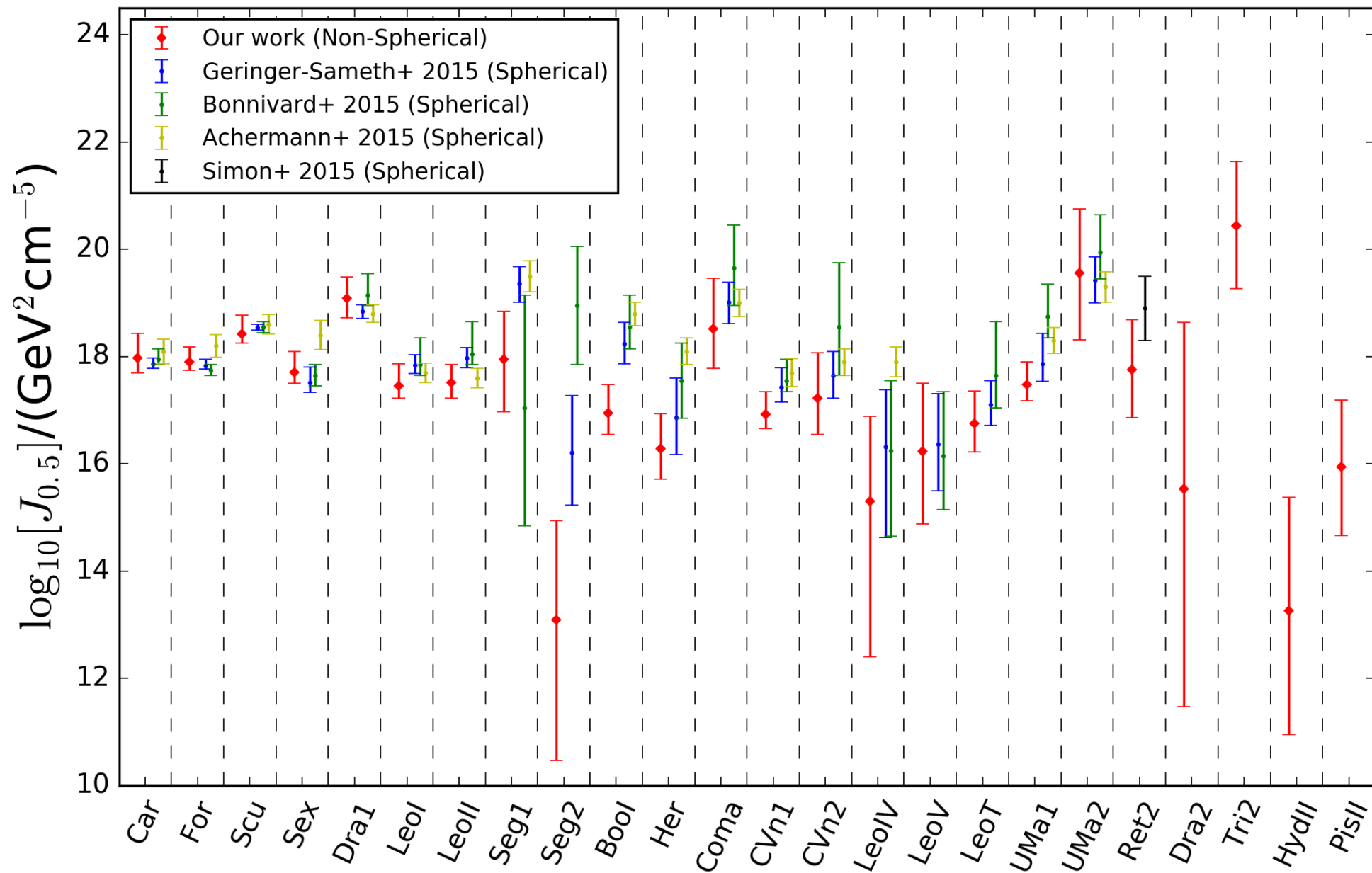
矮小銀河の “J factor”



$$J = \int d\Omega \int d\ell \rho^2(r(\ell, \Omega))$$

- 矮小銀河の密度プロファイルと Jファクターの見積もりは、系に所属する星の運動を観測することで行う
- 通常、最も有望な矮小銀河は $J \sim 10^{19} \text{ GeV}^2/\text{cm}^5$ より大きい Jファクターを持つと考えられてきた
- しかし、超低光度 (*ultrafaint*) 矮小銀河にはそもそも観測できる星の数がそれほどない

矮小銀河の “J factor”



密度プロファイルの見積もり

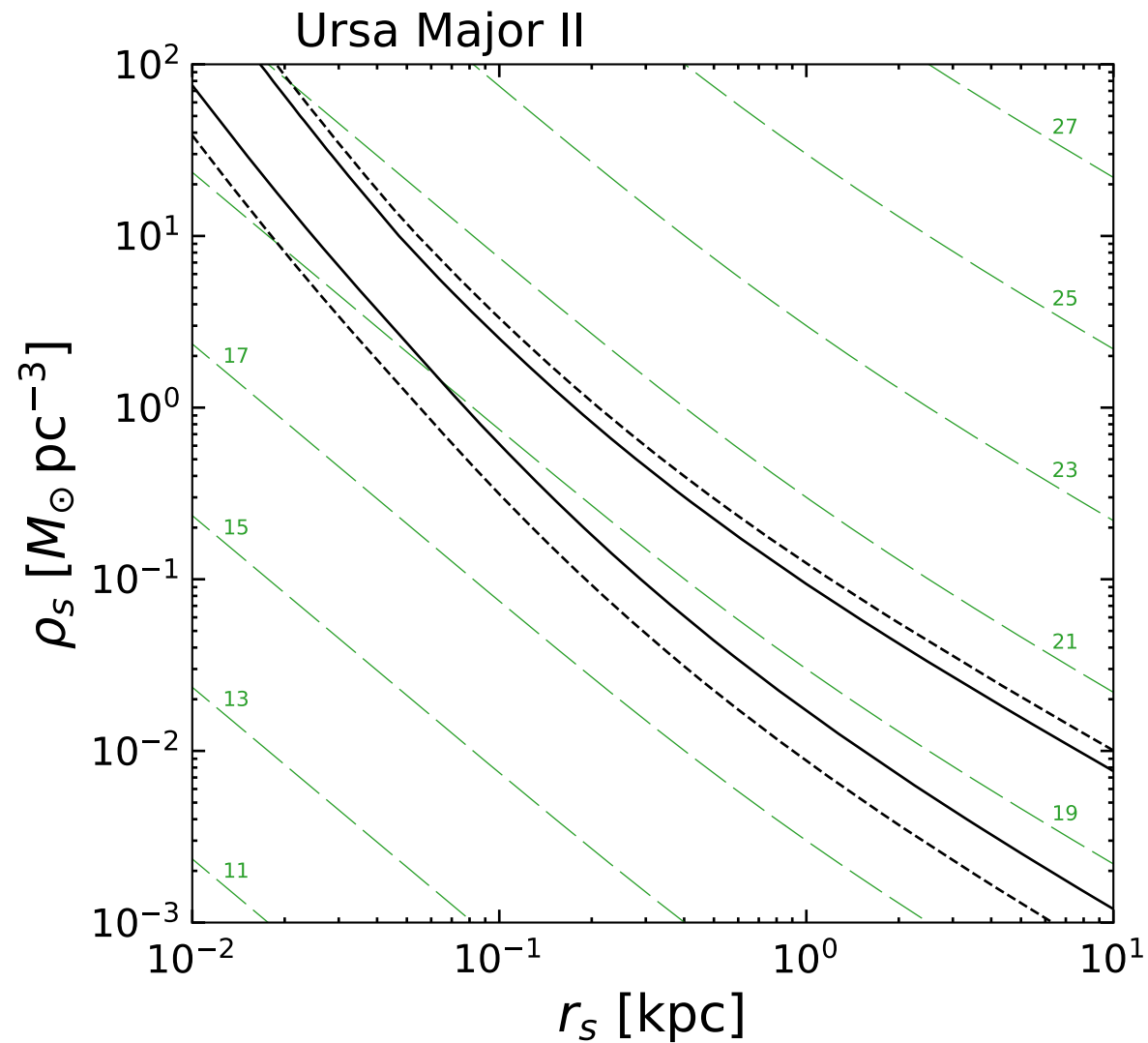
- NFWプロファイルのパラメータである r_s や ρ_s の見積もりは通常ベイズ統計に基づいて行われる：

$$P(r_s, \rho_s | \mathbf{d}) \propto P(r_s, \rho_s) \mathcal{L}(\mathbf{d} | r_s, \rho_s)$$

- しかしデータが充分でない場合は、**事後 (posterior) 分布は、事前 (prior) 分布の選び方に大きく依存**してしまう
- 通常 r_s 、 ρ_s の両方について **log-uniform 事前分布**が用いられてきた
- データが少ないため、頻度論的 (frequentist) 統計は極めて難しく、出来てもサイズが大きくデータ量も豊富な古典的 (classical) 矮小銀河にのみ限られる (Chiappo et al. 2016, 2018)
- 解析的サブハローモデルにより、**最も現実的な事前分布**の計算が可能に

Satellite prior のインパクト

Ando, Geringer-Sameth, Hiroshima, Hoof, Trotta, Walker, arXiv:2002.11956

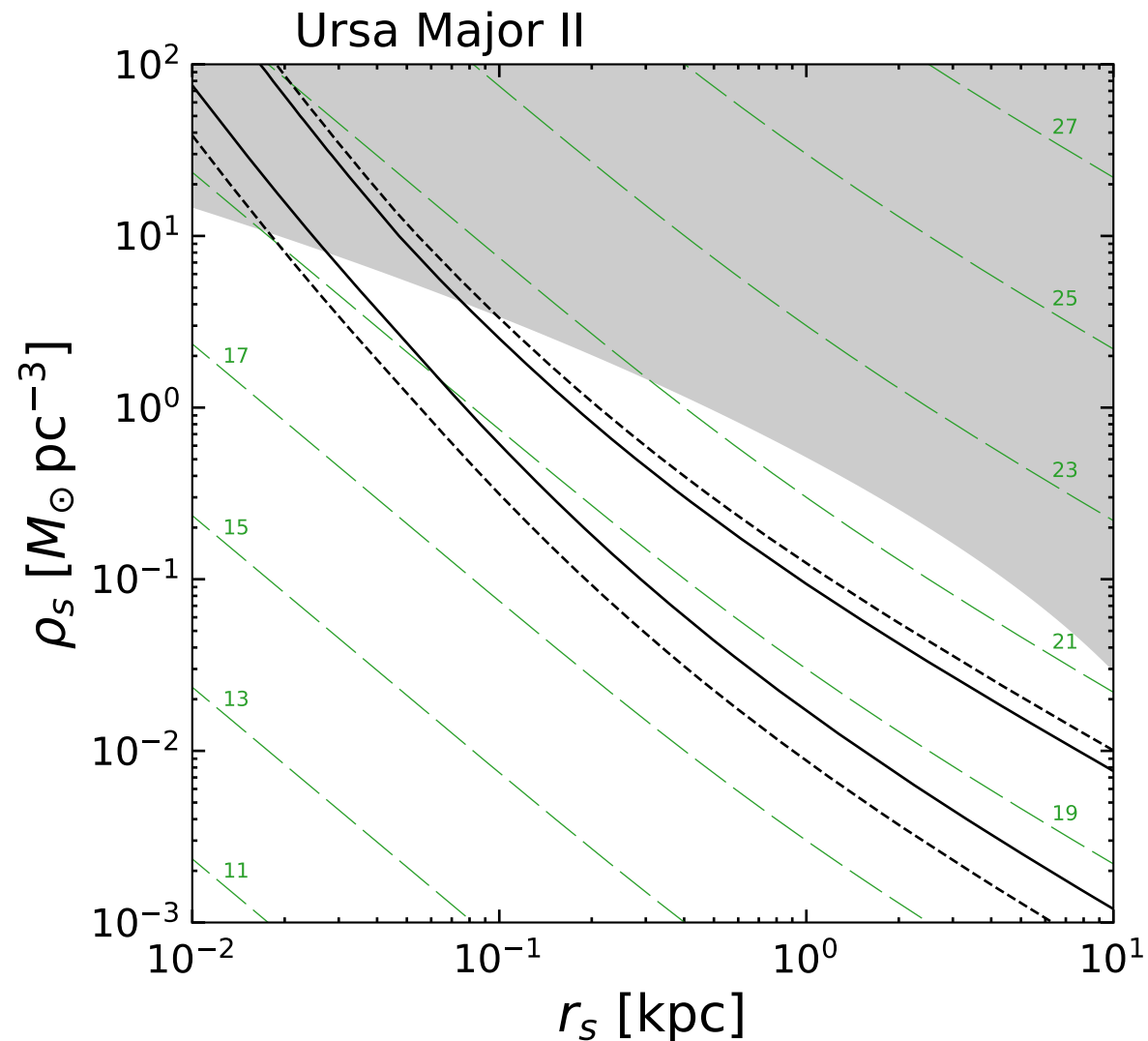


- データが少ないと r_s と ρ_s の縮退が残る

- **Black:** Likelihood contours
- **Green:** $\log [J/(\text{GeV}^2/\text{cm}^5)]$

Satellite prior のインパクト

Ando, Geringer-Sameth, Hiroshima, Hoof, Trotta, Walker, arXiv:2002.11956

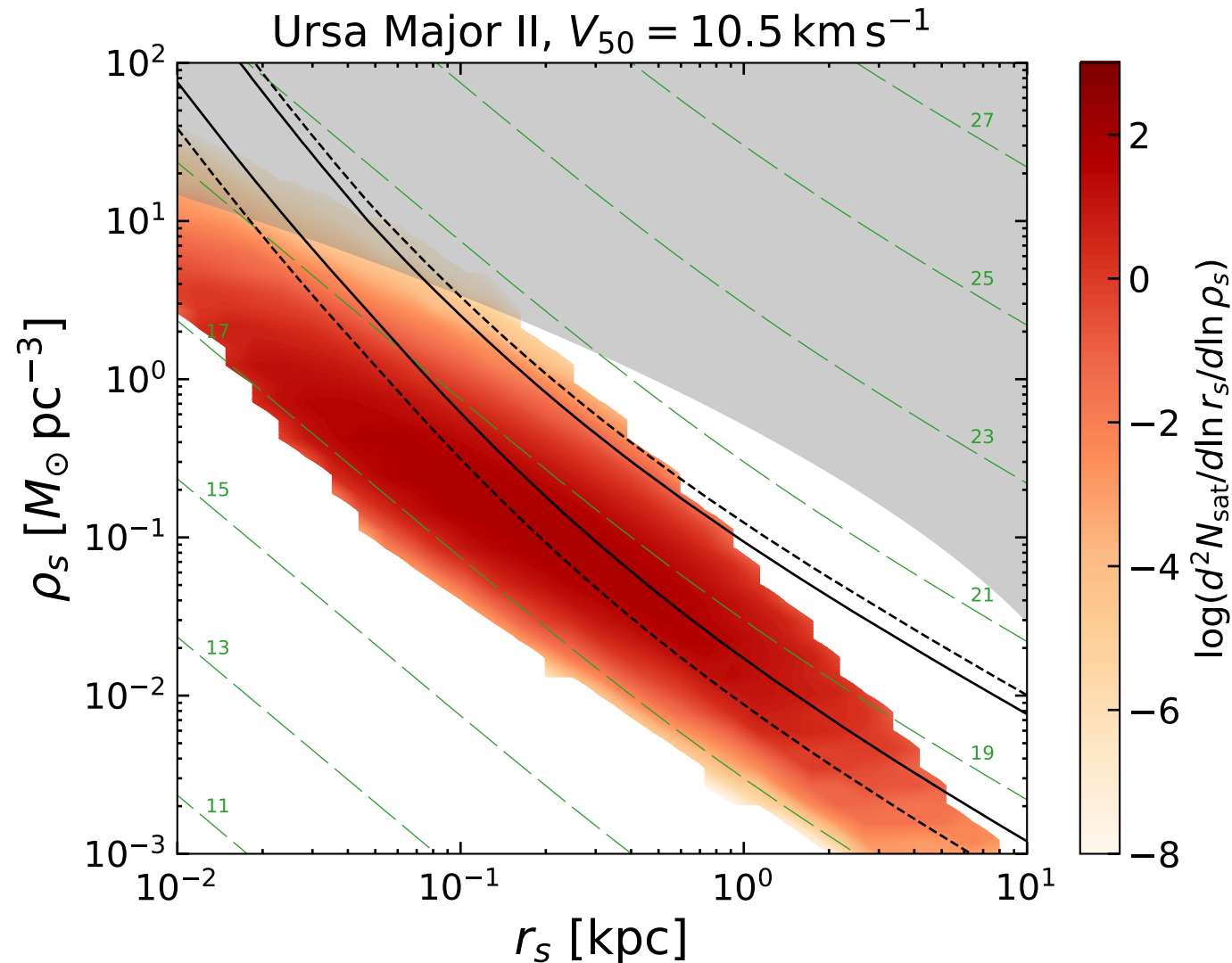


- **Black:** Likelihood contours
- **Green:** $\log [J/(\text{GeV}^2/\text{cm}^5)]$

- データが少ないと r_s と ρ_s の縮退が残る
- 過去に宇宙論的な考察からあまりにも密度の高い領域は除外されてきた (e.g., Geringer-Sameth et al. 2015)

Satellite prior のインパクト

Ando, Geringer-Sameth, Hiroshima, Hoof, Trotta, Walker, arXiv:2002.11956

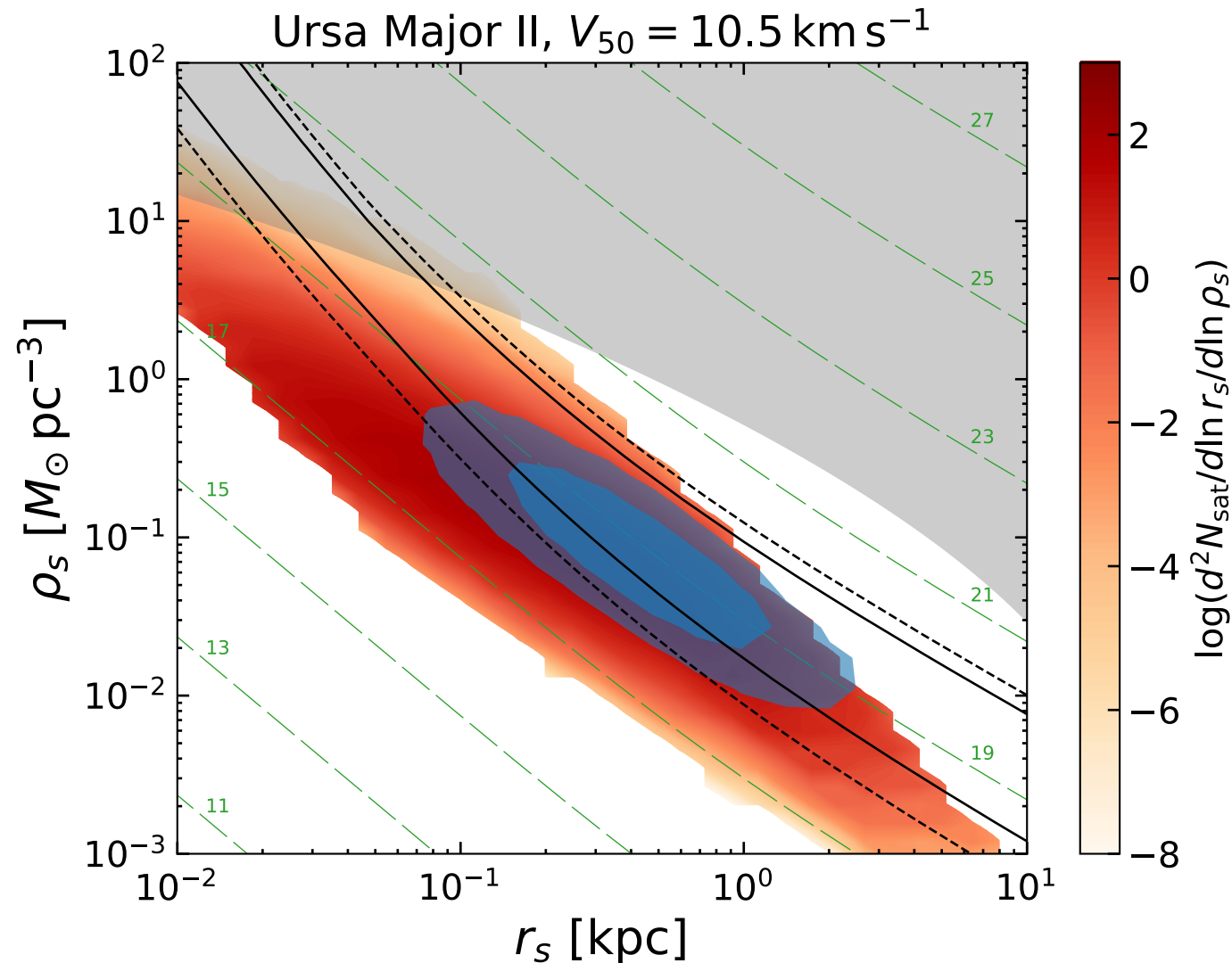


- **Black:** Likelihood contours
- **Green:** $\log [J/(\text{GeV}^2/\text{cm}^5)]$
- **Red:** Prior density

- データが少ないと r_s と ρ_s の縮退が残る
- 過去に宇宙論的な考察からあまりにも密度の高い領域は除外されてきた (e.g., Geringer-Sameth et al. 2015)
- Satellite prior により事前確率のより現実的なモデル化が可能となり、同時にパラメータ間の縮退も自然に解ける

Satellite prior のインパクト

Ando, Geringer-Sameth, Hiroshima, Hoof, Trotta, Walker, arXiv:2002.11956

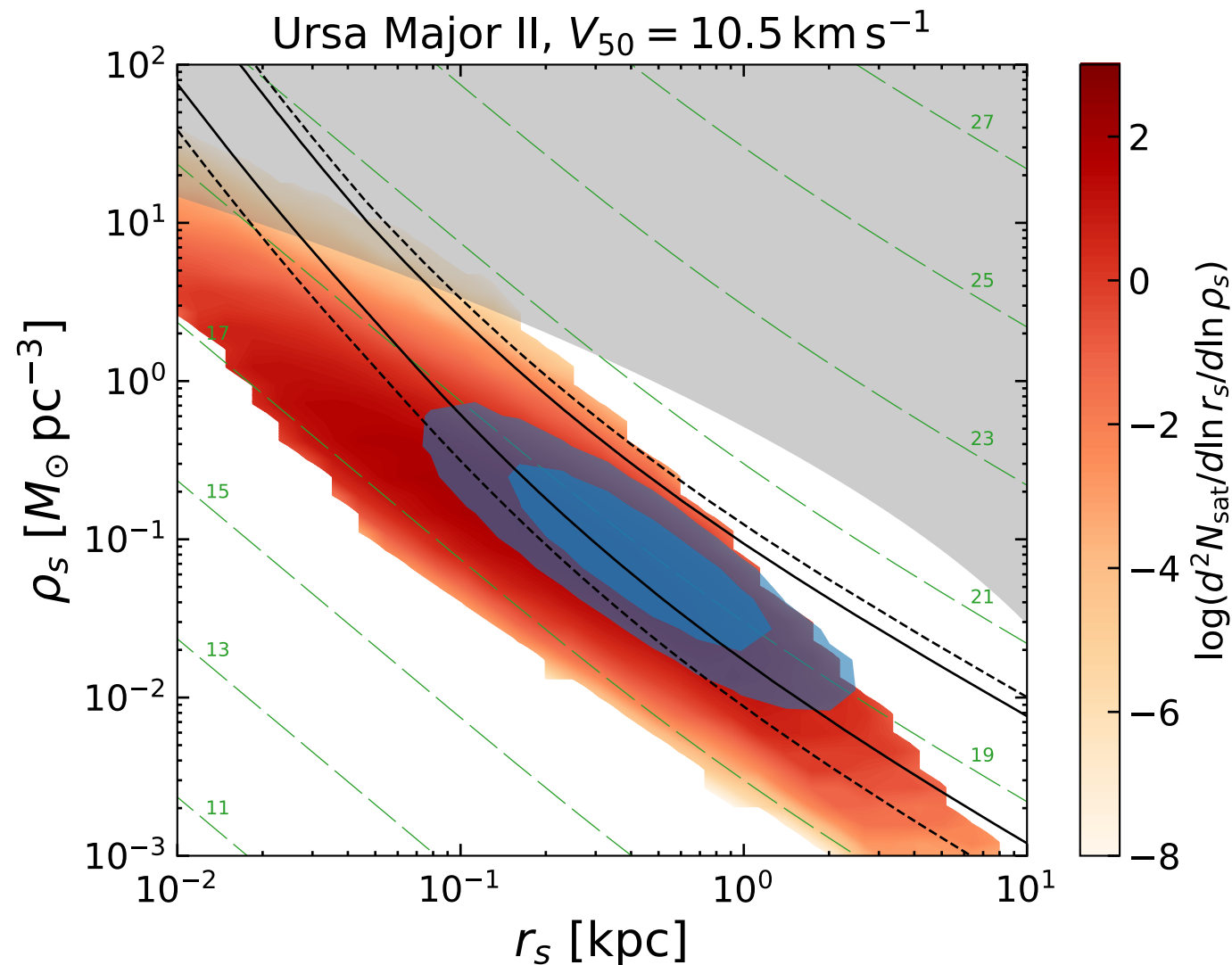


- **Black:** Likelihood contours
- **Green:** $\log [J / (\text{GeV}^2 / \text{cm}^5)]$
- **Red:** Prior density
- **Blue:** Posterior density

- データが少ないと r_s と ρ_s の縮退が残る
- 過去に宇宙論的な考察からあまりにも密度の高い領域は除外されてきた (e.g., Geringer-Sameth et al. 2015)
- Satellite prior により事前確率のより現実的なモデル化が可能となり、同時にパラメータ間の縮退も自然に解ける

Satellite prior のインパクト

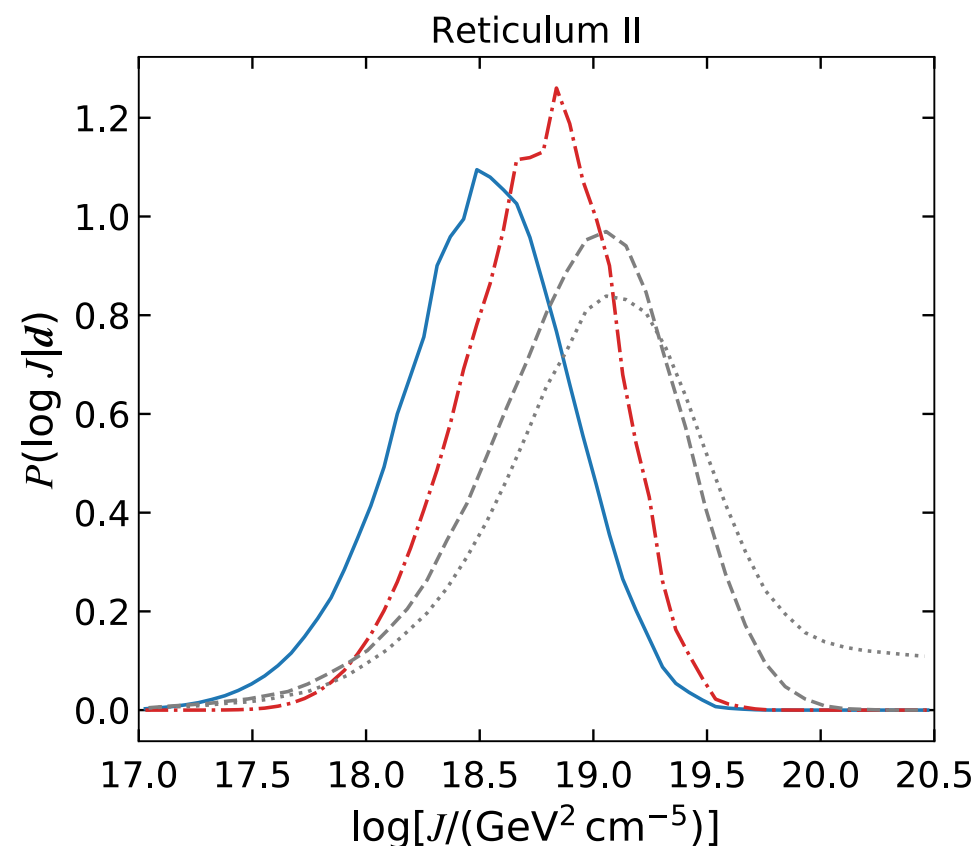
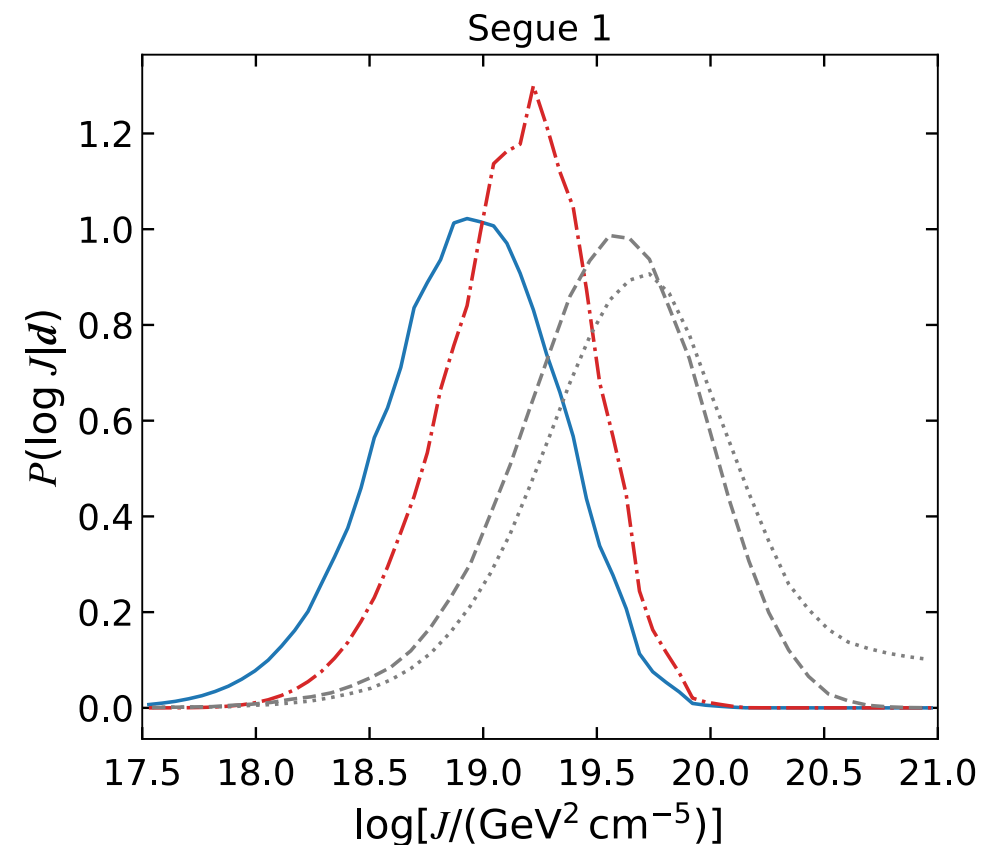
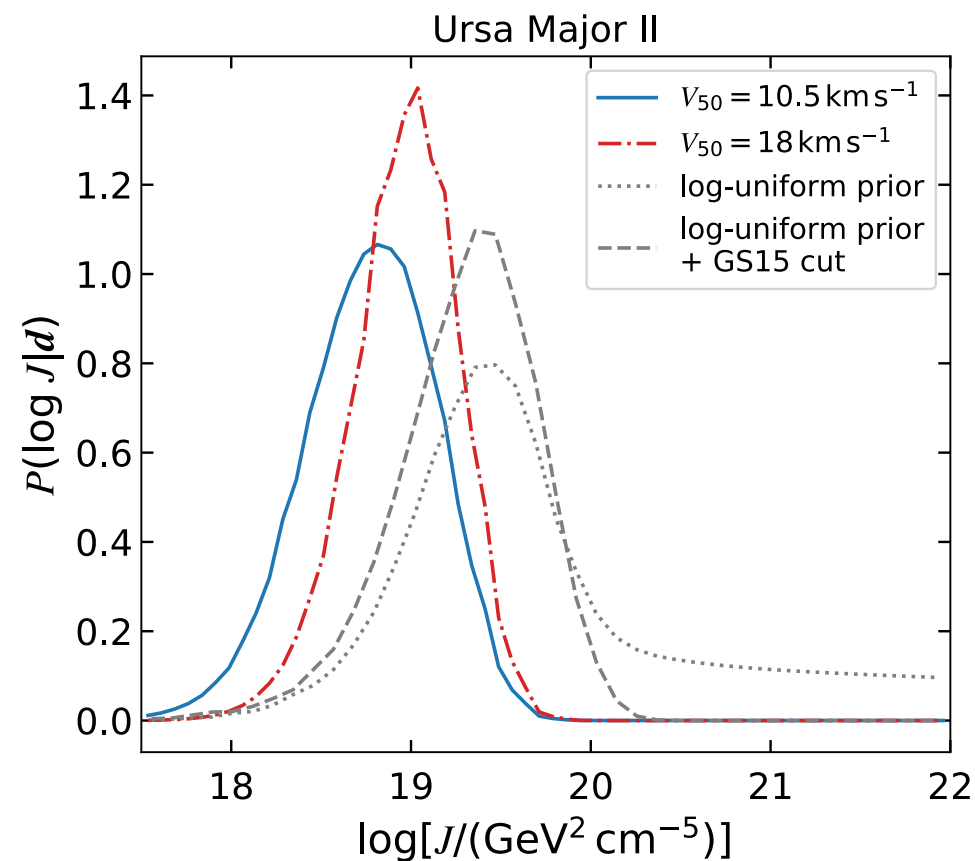
Ando, Geringer-Sameth, Hiroshima, Hoof, Trotta, Walker, arXiv:2002.11956



- **Black: Likelihood contours**
- **Green: $\log [J/(\text{GeV}^2/\text{cm}^5)]$**
- **Red: Prior density**
- **Blue: Posterior density**

- データが少ないと r_s と ρ_s の縮退が残る
- 過去に宇宙論的な考察からあまりにも密度の高い領域は除外されてきた (e.g., Geringer-Sameth et al. 2015)
- Satellite prior により事前確率のより現実的なモデル化が可能となり、同時にパラメータ間の縮退も自然に解ける
- 矮小銀河のような大きなサイズのハローは数が少ないため、シミュレーションを用いてモデル化することは極めて困難

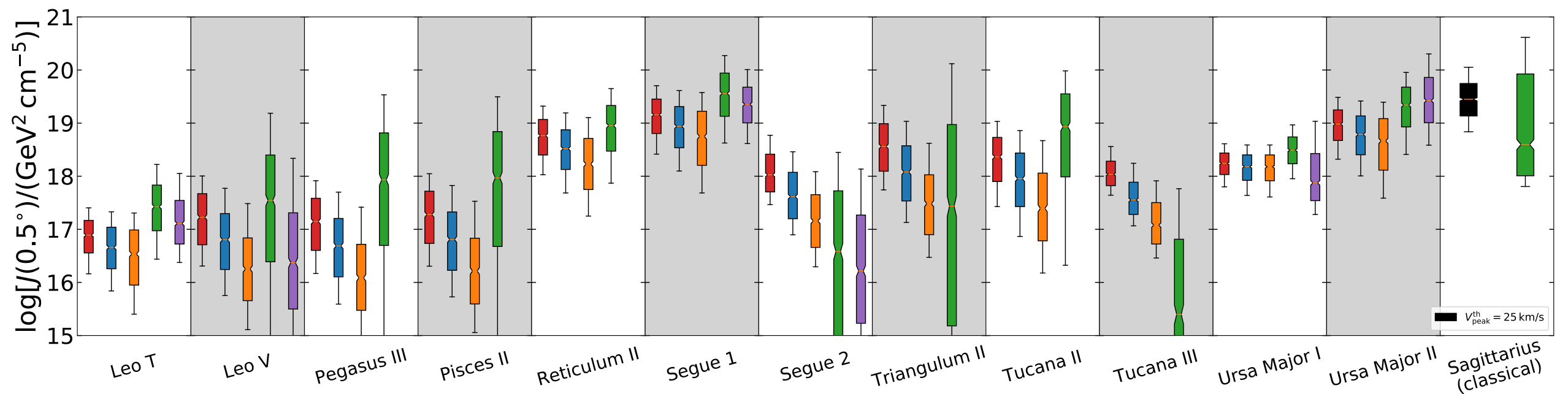
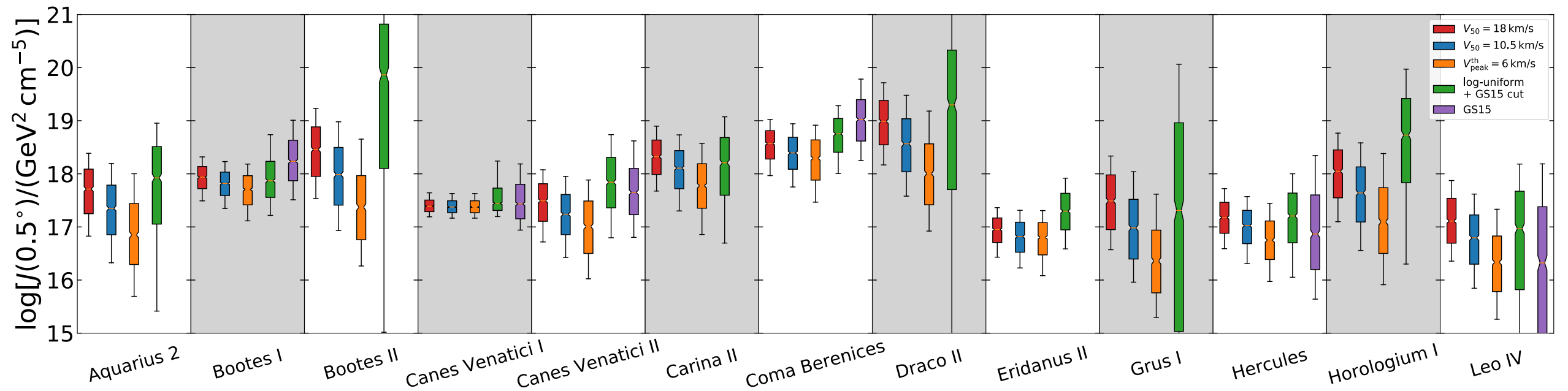
Satellite prior のインパクト



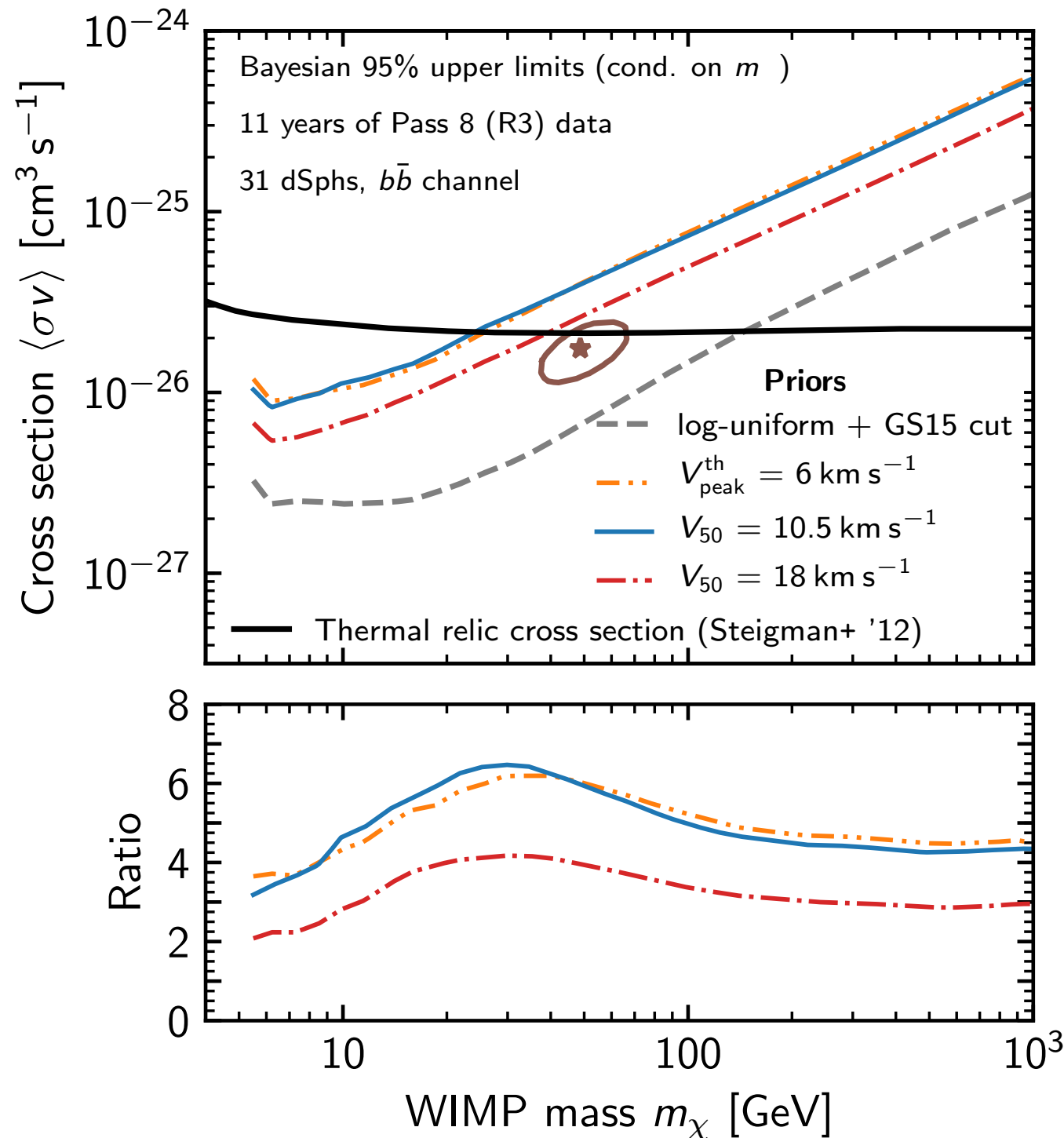
Ando, Geringer-Sameth, Hiroshima, Hoof, Trotta, Walker, arXiv:2002.11956

- Satellite prior を使うことで J ファクターの事後分布は系統的に値の低い方へシフトする
- その度合いは銀河形成の条件に依存

Satellite prior のインパクト



対消滅断面積への制限



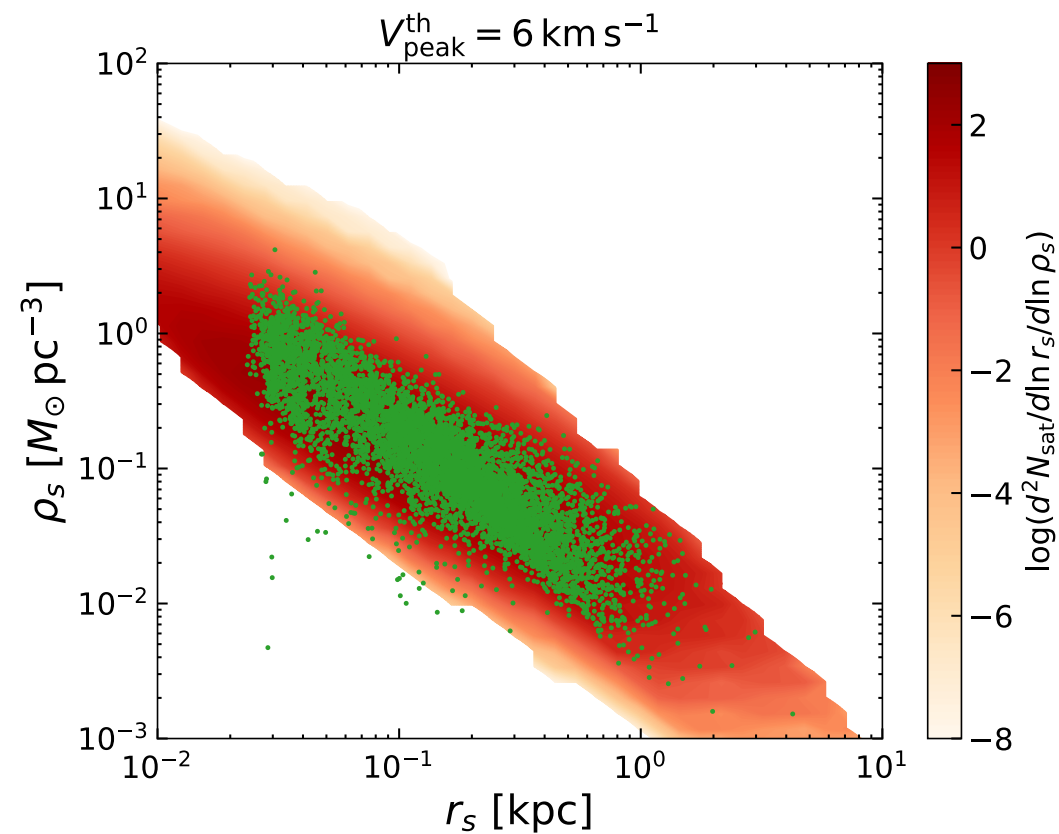
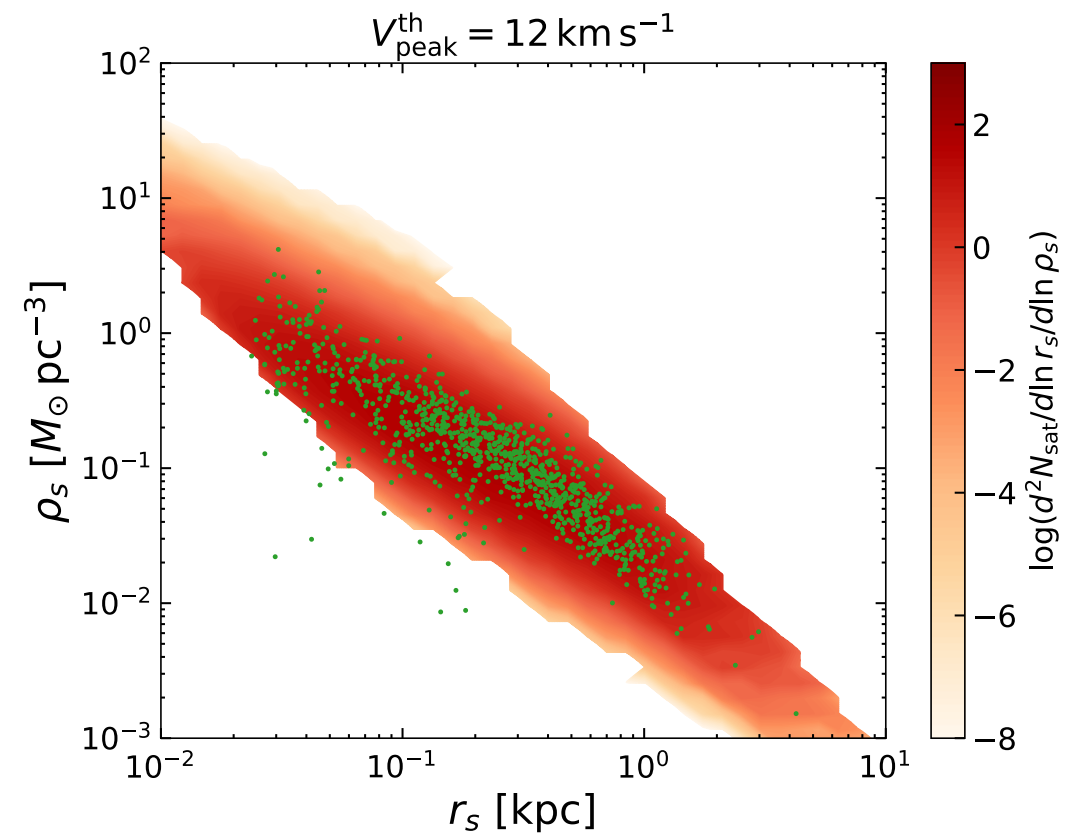
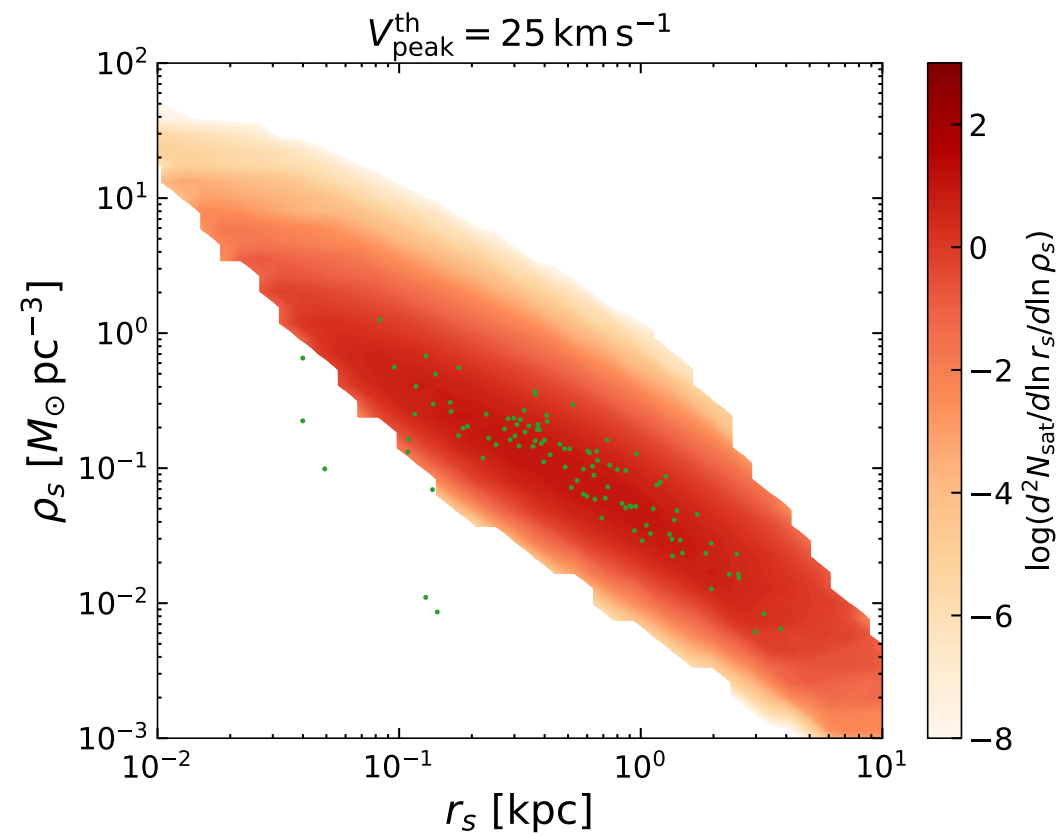
- 現実的な事前確率を採用することで、制限が**ファクター2-7弱くなる**
- 銀河形成条件への依存性は比較的小さく、**ロバストな制限**といふことができる
- いわゆる熱的 WIMP に必要とされる断面積は、20-50 GeV 以下でのみ棄却される
- 近い将来の CTA で得られる wino など重い暗黒物質候補に対しても有用なアプローチ

結論：公募研究への展望

- 暗黒物質の直接・間接探査に重要となる**サブハローの解析的モデル**を構築
 - 任意の低質量側まで質量関数を予言し、対消滅ブーストのより正確な見積もりが可能に
 - 矮小銀河の密度プロファイルをより正確に見積もり、対消滅断面積への制限が従来考えられていたものよりファクター 2-7 弱くなることを示した
- **公募研究**：この解析的サブハローモデルを用いて、宇宙・地上・地下実験における暗黒物質探査における理論的サポートをおこなう
 - 銀河円盤の影響；太陽系近傍にサブハローが存在する確率はどの程度か？
 - 天の川銀河ハローの進化史や原始パワースペクトルへの依存性

Backup

Comparison with VL-II simulations



Ando, Geringer-Sameth, Hiroshima,
Hoof, Trota, Walker, in preparation