

2025/03/25

「宇宙線シャワー観測によるマルチメッセンジャー天文学の推進」研究会

高解像度シミュレーションデータを用いた 地球近傍における暗黒物質密度の評価

岡山理科大
中條初萌 (B4)

共同研究者：中林拓帆(総研大), 正木彰伍(中京大), 長尾桂子(岡山理科大)

研究の概要

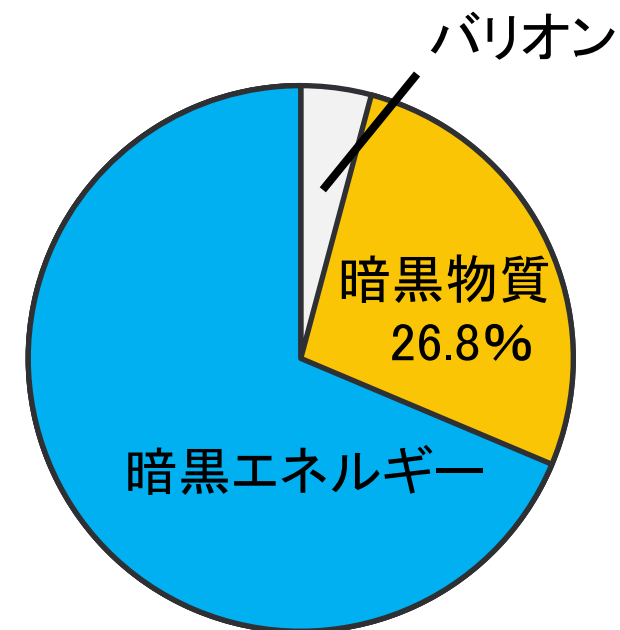
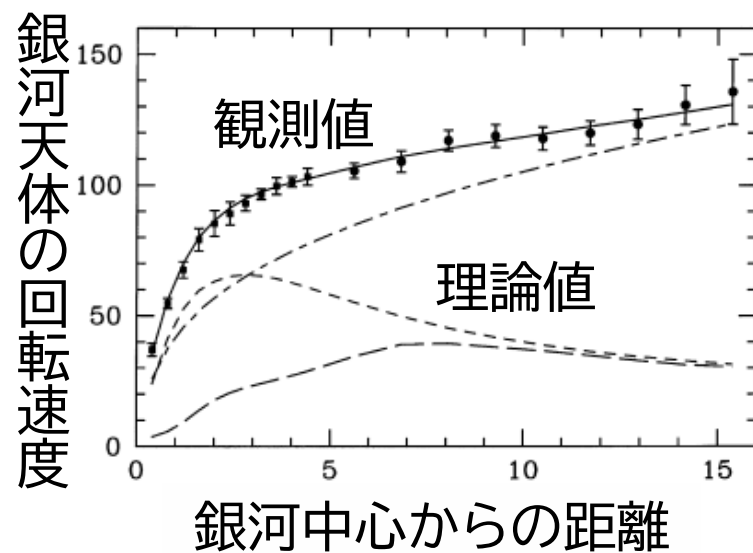
- 高解像度の宇宙論的シミュレーションを用いて、地球近傍での暗黒物質密度を評価した。

目次

1. **研究背景:地球近傍の暗黒物質密度をどう求めるか**
2. 手法:シミュレーションデータから地球近傍を抽出する
3. まとめ

暗黒物質

- 観測が直接できないが**重力を及ぼす**未知の物質
- 暗黒物質の証拠
 - 銀河の回転曲線
 - 弾丸銀河団の衝突
 - 重力レンズ
 - 宇宙背景放射の観測 など

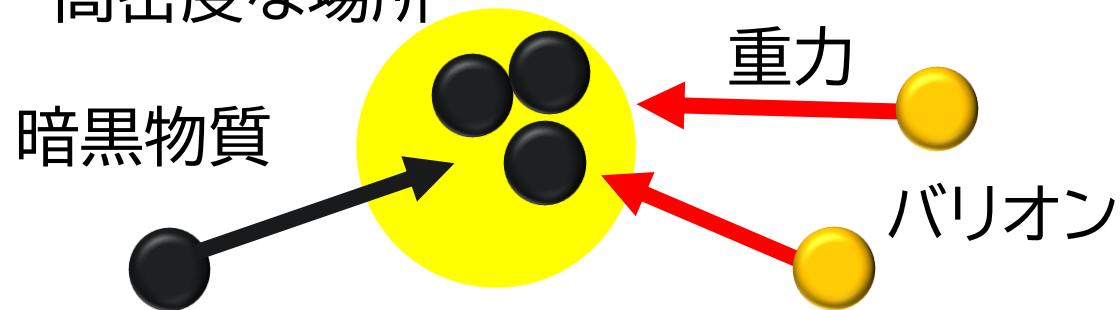


Planck衛星チーム

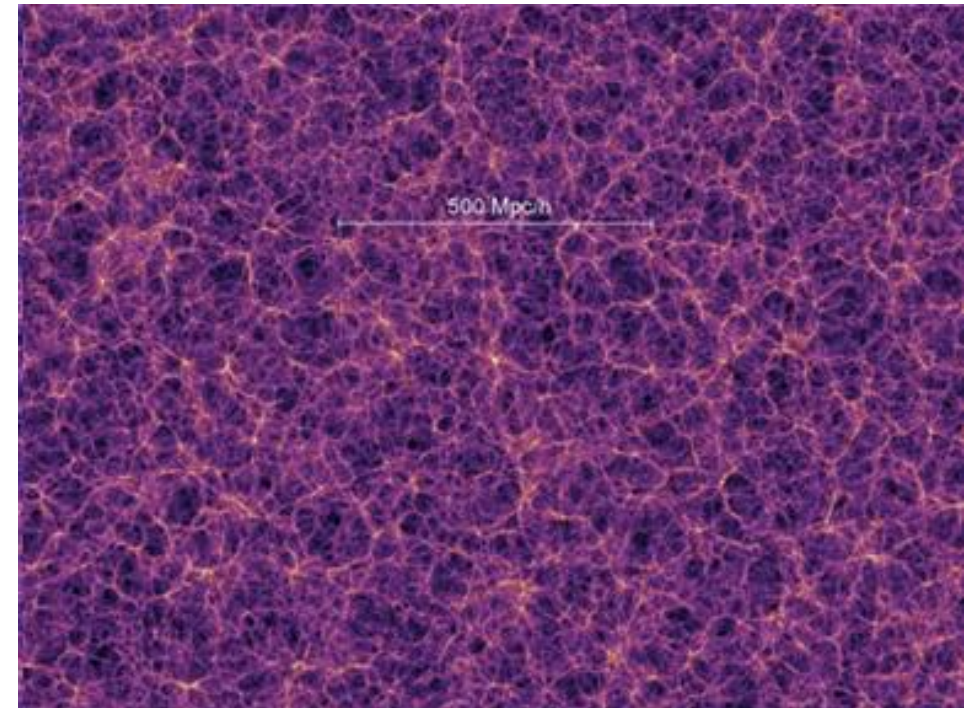
Corbelli, Salucci
astro-ph/9909252

暗黒物質と宇宙の大規模構造

- 暗黒物質が宇宙の骨格を形成
高密度な場所

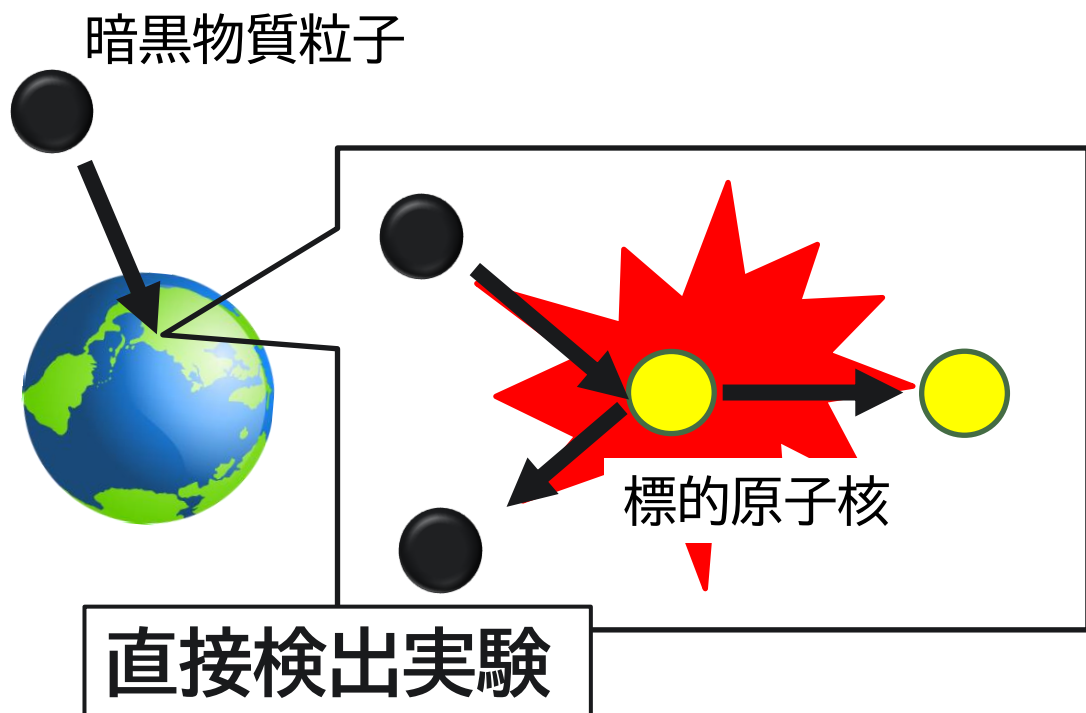


- 宇宙の大規模構造の形成
 - 高密度な場所がフィラメント状になる
 - 銀河や銀河団、ボイドが形成



Arbey, Mahmoudi
arXiv: 2104.11488

暗黒物質を検出したい



- 暗黒物質が原子核と散乱する確率

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{\rho_{DM}}{m_{DM}} \cdot \frac{C_T}{A} \cdot \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{f(v)}{v} \cdot \sigma(E_R, v) dv$$

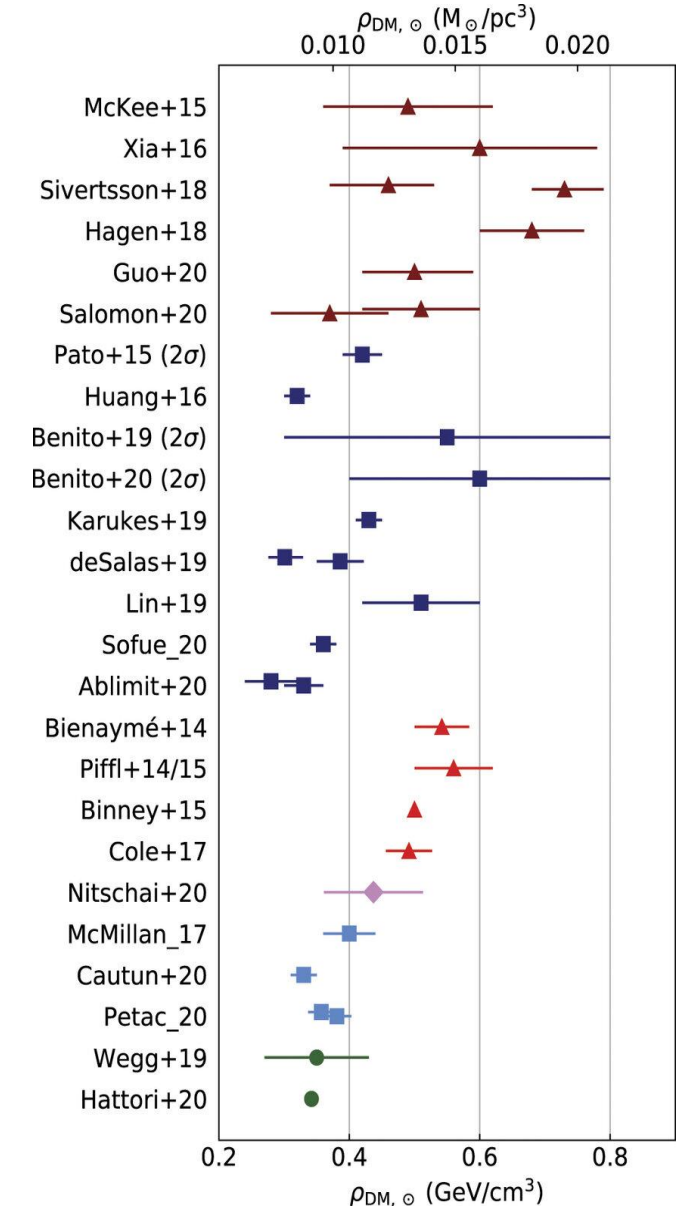
地球近傍の暗黒物質密度

単位反跳エネルギーあたりの検出率

地球近傍の暗黒物質密度が重要

観測からの 地球近傍の暗黒物質密度の推定

- 地球近傍の暗黒物質密度の推定手法
 - 銀河面に垂直な方向の星の運動を用いた推定
 $\rho_{\text{DM}} = 0.4 - 0.6 \text{ GeV/cm}^3$
 - 銀河の回転曲線を用いた推定
 $\rho_{\text{DM}} = 0.3 - 0.5 \text{ GeV/cm}^3$
- 観測からの示唆
 - $\rho_{\text{DM}} = 0.3 - 0.6 \text{ GeV/cm}^3$



シミュレーションからの 地球近傍の暗黒物質密度の推定

- 宇宙論的シミュレーション
 - 宇宙の構造や進化を再現したシミュレーション
 - 暗黒物質自体のデータが入っている

Via Lactea II シミュレーション (2008)

r	[kpc]	8
ρ	$[M_{\odot} \text{ pc}^{-3}]$	1.056×10^{-2}
r_{sph}	[kpc]	
$\langle M_{\text{sph}} \rangle$	$[M_{\odot}]$	0.401 GeV/cm^3

Zemp et al.
arXiv: 0812.2033

MaGICC シミュレーション (2016)

Simulation	g1536DM (DM-only)	g1536 (DM+baryons)	g15784 (DM+baryons)
Virial Mass $[M_{\odot}]$	7.48×10^{11}	5.84×10^{11}	1.50×10^{12}
Virial Radius [kpc]	260	143	328
DM particle mass $[M_{\odot}]$	1.33×10^6	1.11×10^6	1.11×10^6
Circular velocity (at $R = 8$ kpc) [km/s]	108	187	273
Torus ($r_1 = 8$ kpc, $r_2 = 2$ kpc)			
Number of DM particles	2085	4840	6541
Average DM density $[\text{GeV/cm}^3]$	0.270	0.346	0.493
Average velocity ($\langle U, V, W \rangle$) [km/s]	(0.0, 9.3, -0.9)	(2.7, 21.0, 2.9)	(0.9, 18.9, 9.4)
Velocity s.d. ($\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W$) [km/s]	(109, 95, 90)	(144, 128, 121)	(205, 166, 177)
RMS speed [km/s]	$98\sqrt{3}$	$133\sqrt{3}$	$184\sqrt{3}$
Maximum speed [km/s]	359	454	600.

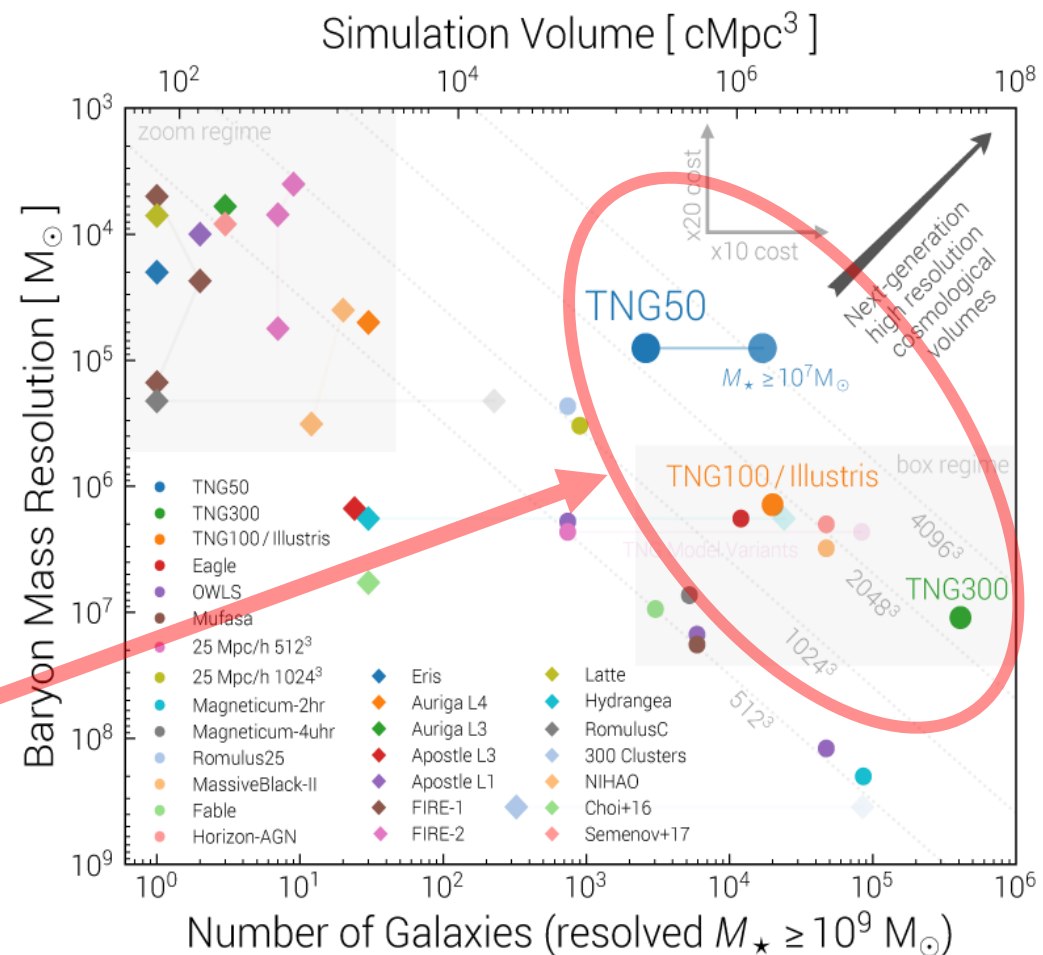
Kelso et al.
arXiv: 1601.04725

宇宙論的シミュレーションの解像度

Nelson et al.
arXiv: 1812.05609

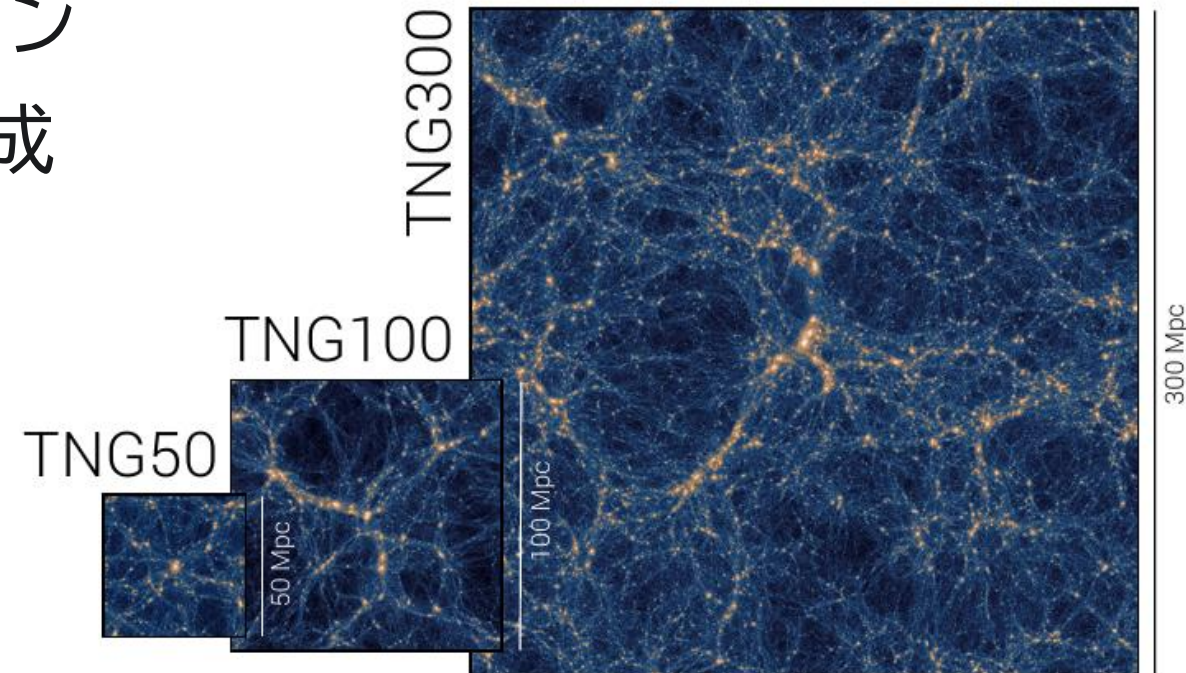
- バリオン質量分解能
 - シミュレーション内のバリオンの質量を示す指標
 - シミュレーション内のバリオンによる効果の強さに影響

IllustrisTNGシミュレーション



IllustrisTNGシミュレーション

- 宇宙論的流体力学シミュレーション
- 3つのシミュレーション領域で構成
 - TNG300
 - TNG100
 - TNG50
 - 高い解像度をもつシミュレーション
 - 銀河形成と進化の再現に特化
- シミュレーションデータを公開



Nelson et al.
arXiv: 1812.05609

目次

1. 研究背景:地球近傍の暗黒物質密度をどう求めるか
2. 手法:シミュレーションデータから地球近傍を抽出する
3. まとめ

銀河系の構造と太陽系の位置

- 銀河系の構造

- 質量: $1.15 \times 10^{12} M_{\odot}$
- バルジと銀河全体の質量比: 0.150
- バルジ、銀河円盤、ハローで構成

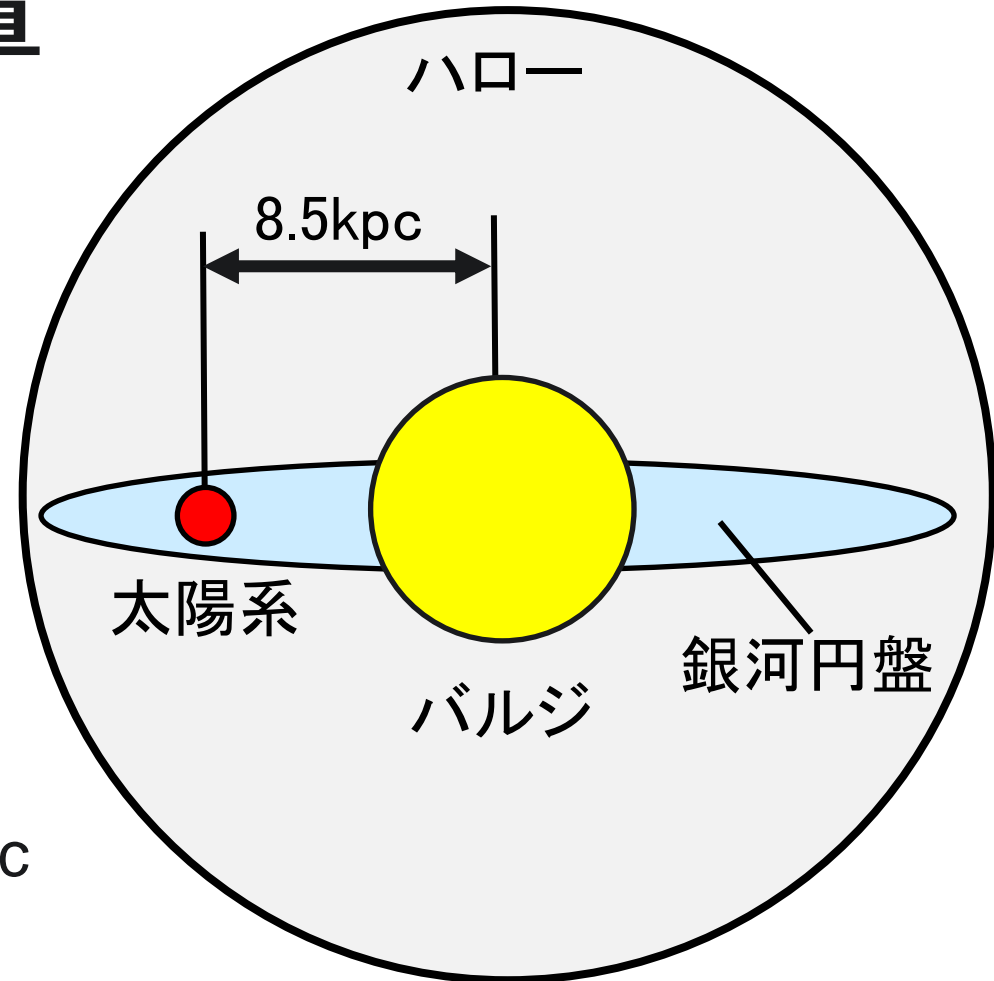
Aragon-Calvo et al.
arXiv: 2208.03338

Licquia et al.
arXiv: 1407.1078

- 太陽系の位置

- 銀河系中心から太陽系までの距離: 8.5kpc
- 銀河円盤上に位置

Salas, Widmark.
arXiv: 2012.11477



銀河系に似た銀河の抽出

- 銀河の質量

Aragon-Calvo et al.
arXiv: 2208.03338

- $0.83 \times 10^{12} M_{\odot} - 2.0 \times 10^{12} M_{\odot}$

- バルジと銀河全体の質量比

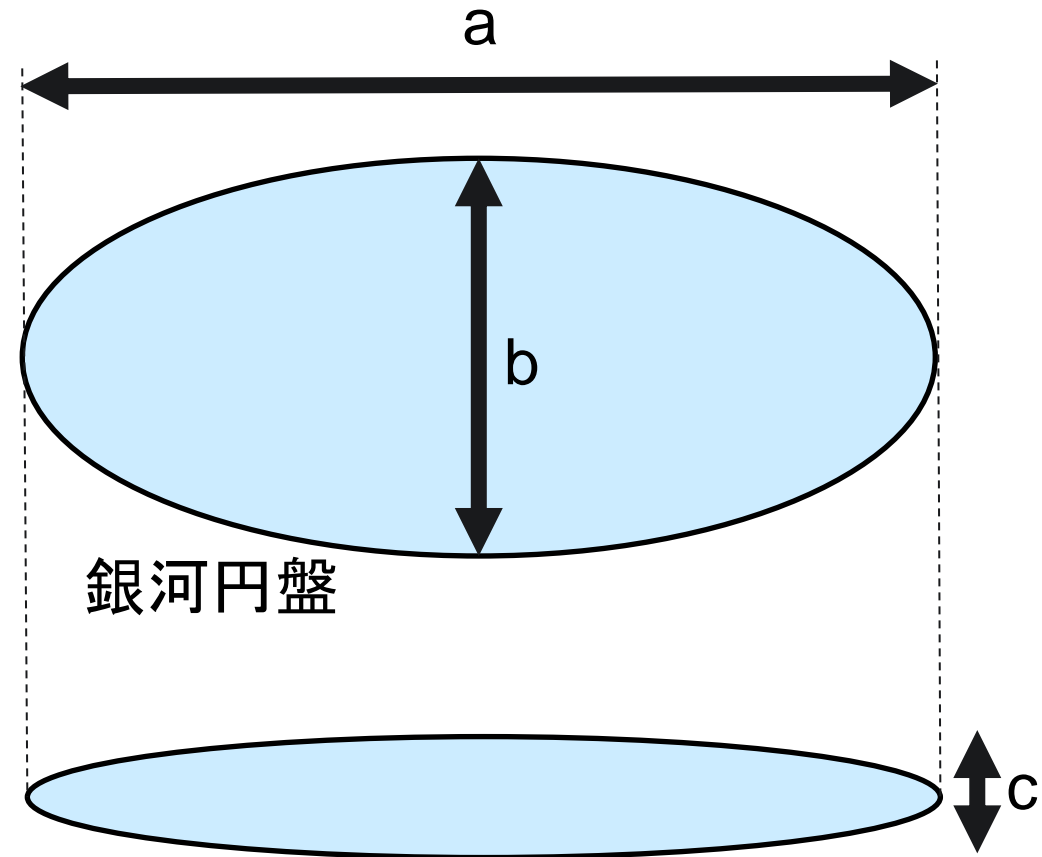
- 0.131 - 0.178

Licquia et al.
arXiv: 1407.1078

- 軸比T → 条件に合う銀河はなかった

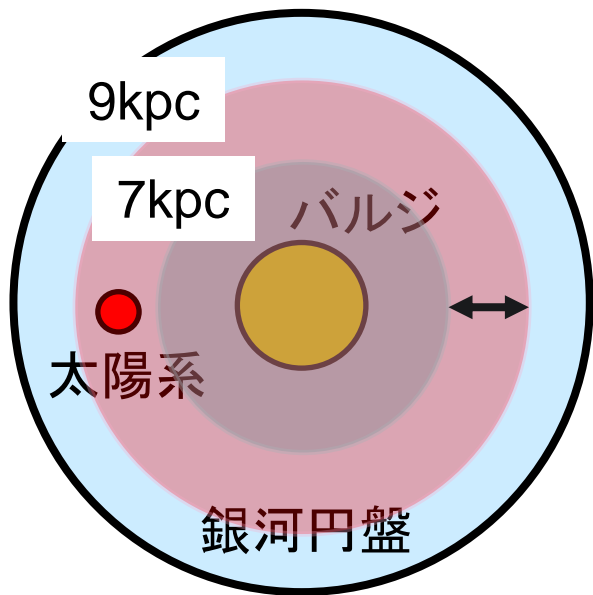
$$T = \sqrt{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + \left(1 - \frac{b}{a}\right)^2} \leq 0.33$$

→ シミュレーションに含まれている5,688,113個の銀河から13個抽出

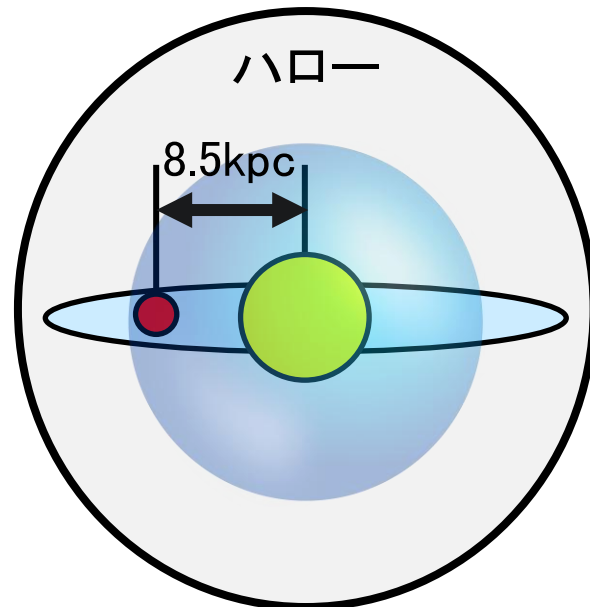


地球周辺の暗黒物質の抽出1

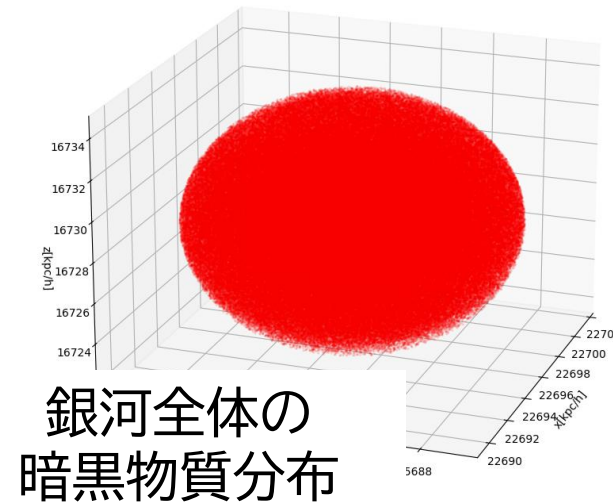
- 銀河中心から太陽系までの距離
 - 7 – 9kpc



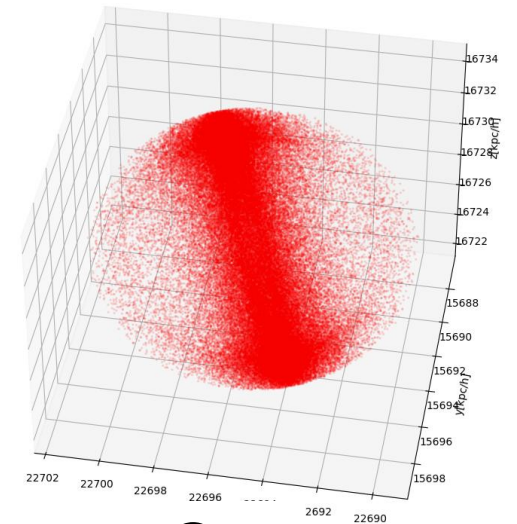
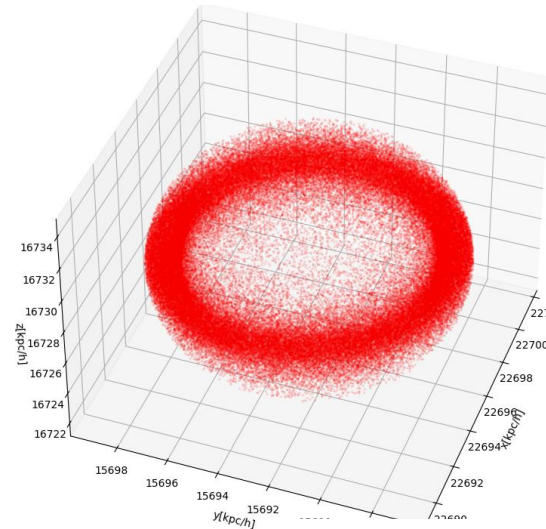
銀河系を上から見た図



銀河系を横から見た図



銀河全体の
暗黒物質分布

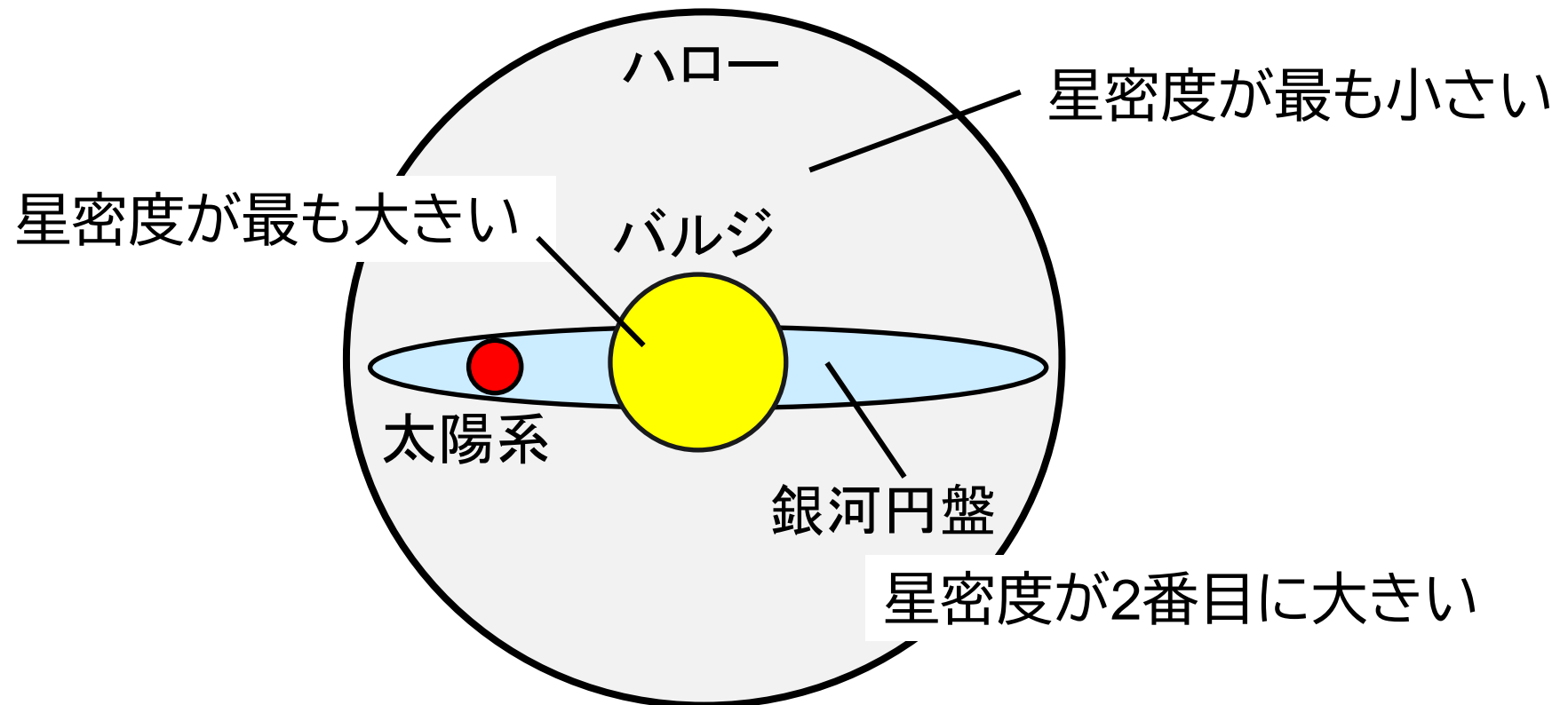


中心から7 – 9kpcの
暗黒物質分布

地球周辺の暗黒物質の抽出2

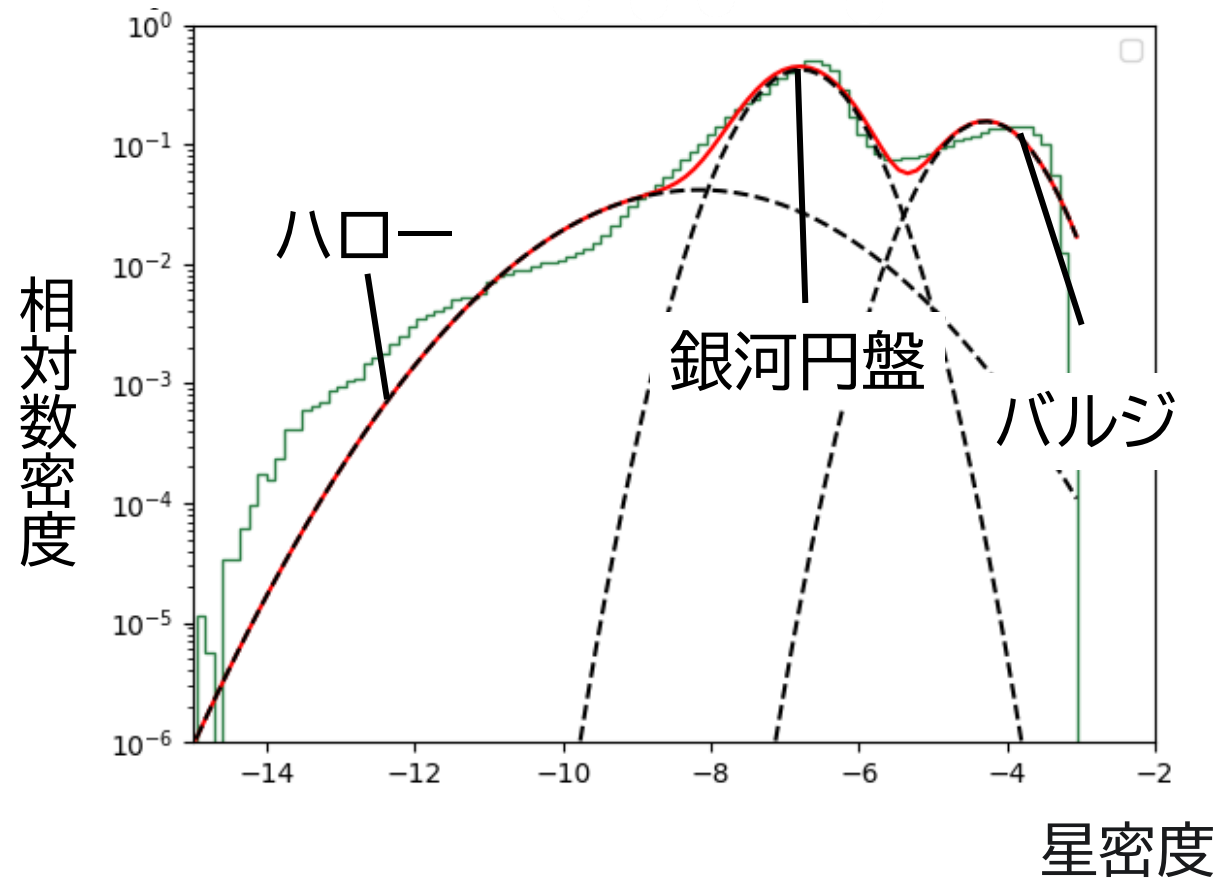
Salas, Widmark.
arXiv: 2012.11477

- 太陽系が銀河円盤上に位置している
 - 銀河13個ごとの全星密度を**バルジ**・**銀河円盤**・**ハロー**に選別



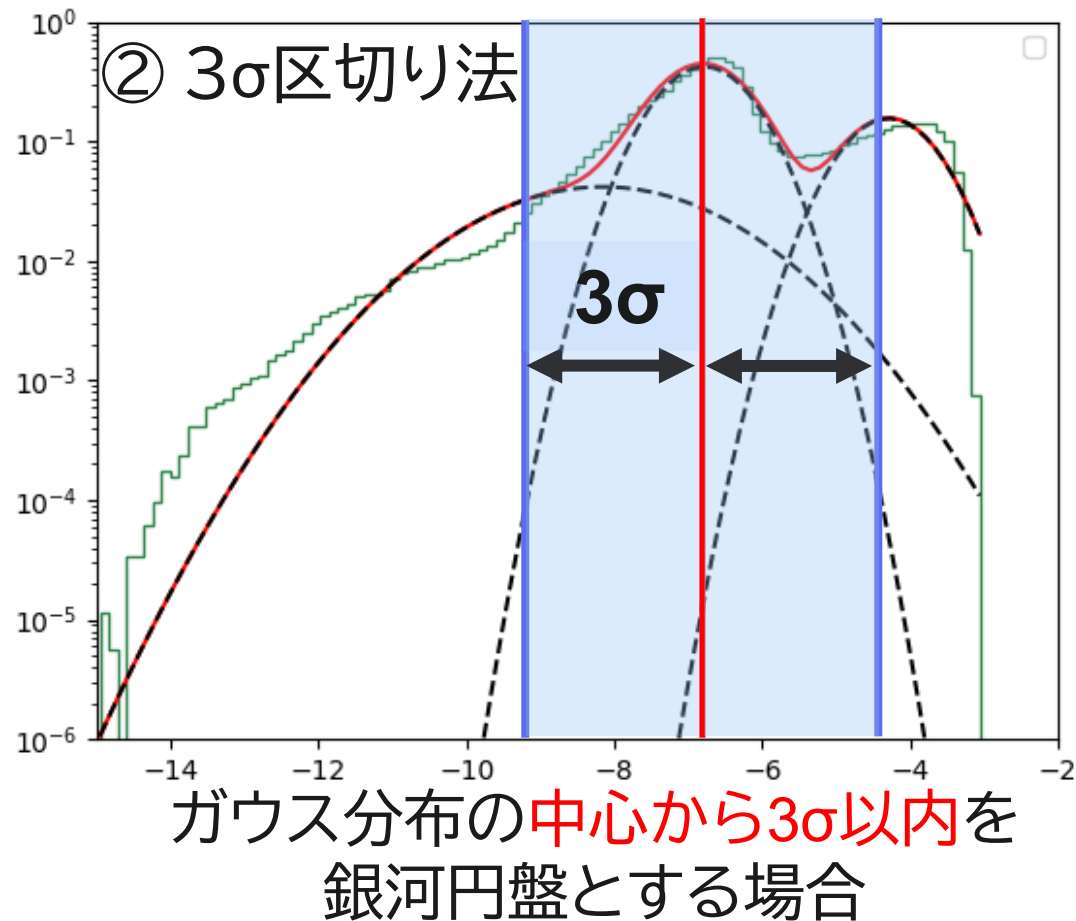
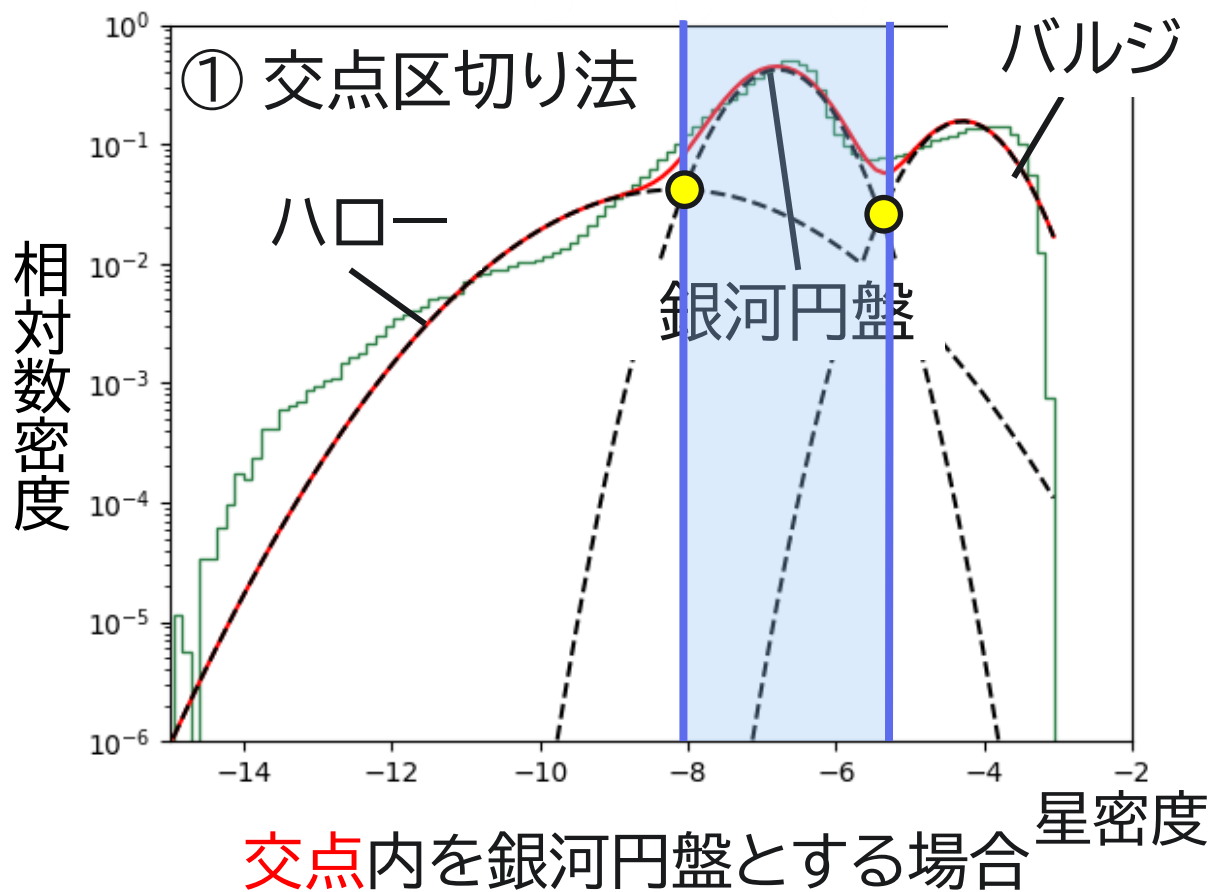
バルジ・銀河円盤・ハローの各成分に選別

- バルジ・銀河円盤・ハローの成分に対応した3つのガウス分布でフィット



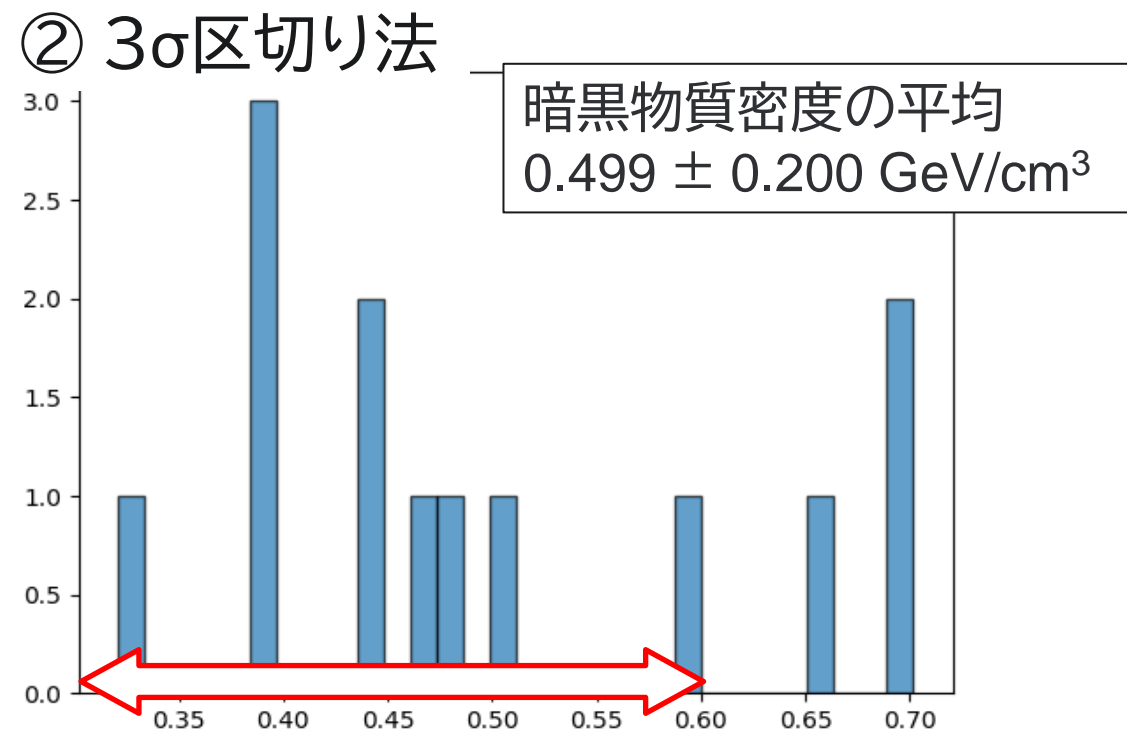
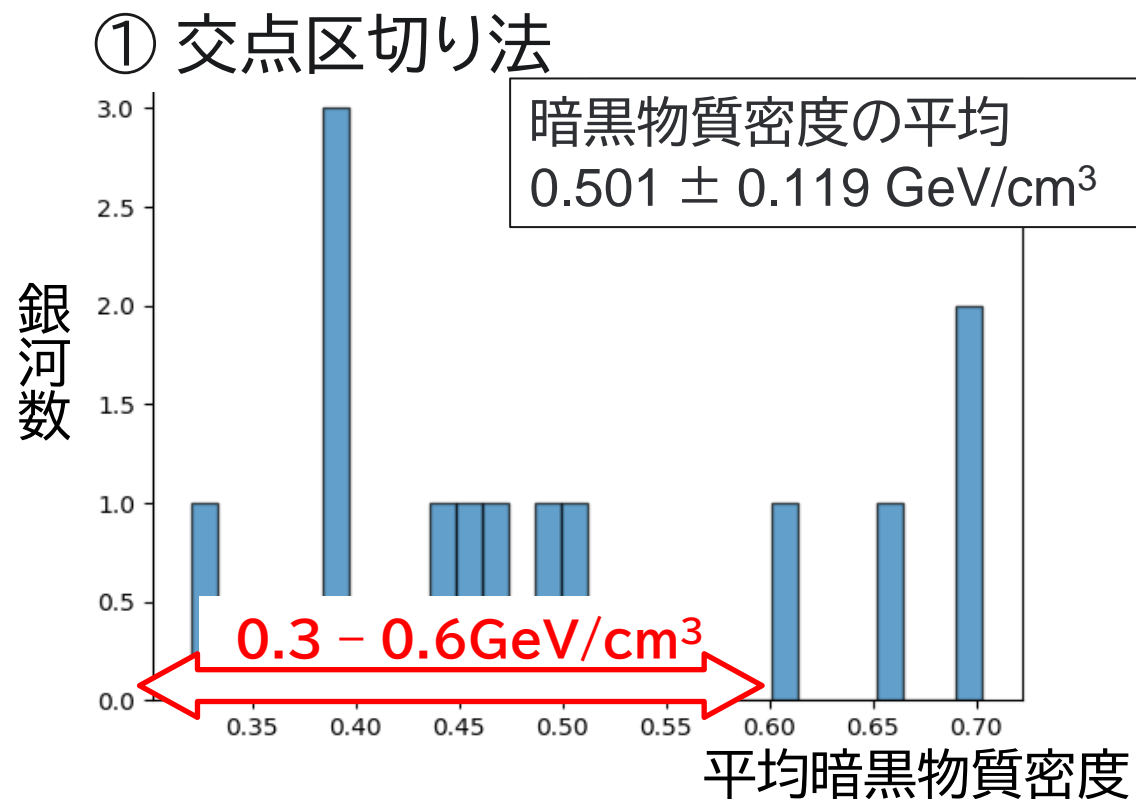
銀河円盤上の抽出

- 2つの手法で銀河円盤上のデータを抽出し、手法の依存性を調べる



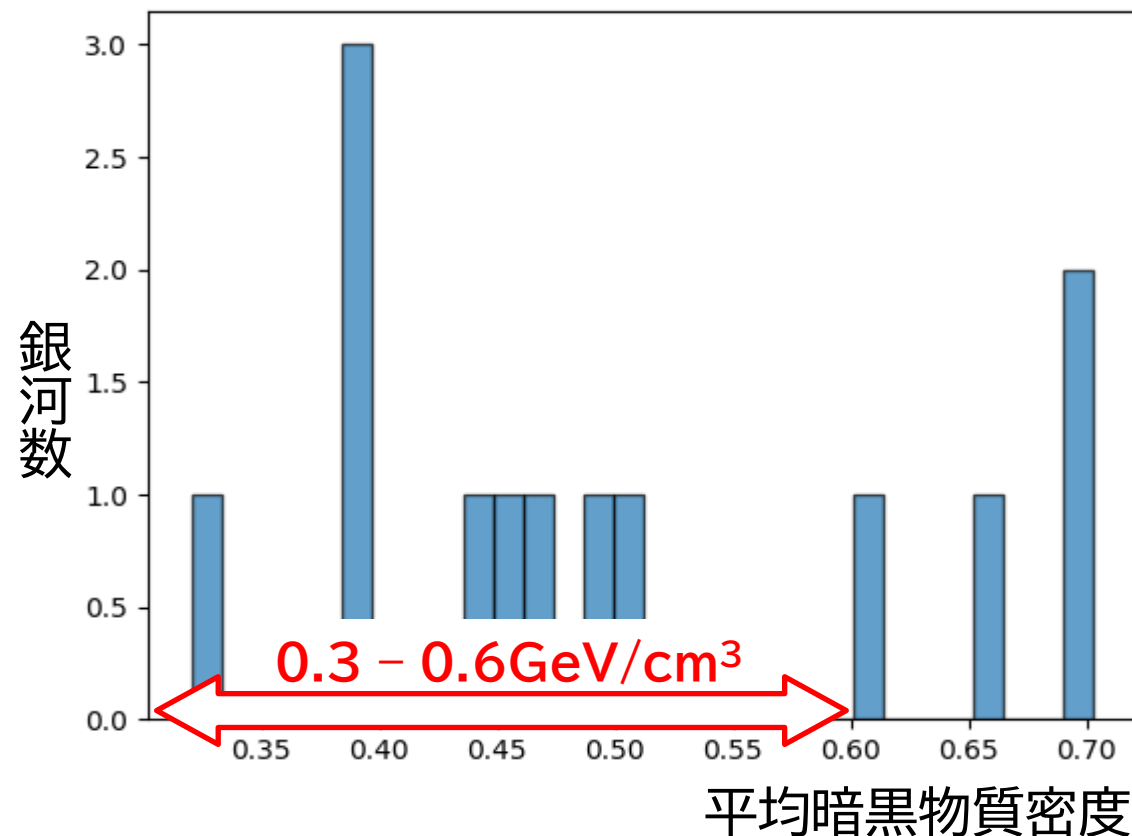
2つの手法を用いた暗黒物質密度の値

抽出された暗黒物質の密度は
データの区切り方にそれほど**依存しない**。



結果

- 抽出した銀河数: 13個
- 抽出した暗黒物質数: 134449
- 銀河ごとの暗黒物質密度量
 - 平均値:
 0.501 ± 0.119 GeV/cm³
 - 最大値の平均:
 1.176 ± 0.295 GeV/cm³
 - 最小値の平均
 0.154 ± 0.031 GeV/cm³



目次

1. 研究背景:地球近傍の暗黒物質密度をどう求めるか
2. 手法:シミュレーションデータから地球近傍を抽出する
3. **まとめ**

まとめと今後の展望

- 高解像度のシミュレーションデータから地球近傍の暗黒物質密度を評価した。
- 平均の暗黒物質密度は、 **0.501 ± 0.119** GeV/cm³。
 - 抽出データの区切り方にほぼ依存しない。
 - 観測から示唆される値と矛盾していない。
- 別グループの先行研究と比較し、解析の妥当性を確認。
- 地球近傍の暗黒物質の速度分布も評価。