Measuring the boson mass of fuzzy dark matter with stellar proper motions

GAゼミ@250422 宮﨑凜

by Gabriel d'Andrade Furlanetto et al. arxiv 2410.18659

[**Abstract**] FDMは、WIMPに代わるダークマター候補の一つである。FDMからなる銀河系ダークマター・ハローは、量子干渉パターンに囲まれたsoliton coreを形成する。このようなハローの性質、すなわちbosonの質量とコア半径をFDMモデルの中で決定するために、将来の天体観測ミッションがどの程度可能かを調べた。この目的のために、ターゲットとなる矮小銀河内の星の3次元位置と速度を含むMockカタログを作成した。MCMCを用いてこれらのカタログを解析したところ、対象銀河内の少なくとも**2000**個の星の固有運動を、速度成分誤差 $\sigma_v \leq$ **3km/s**で測定することで、bosonの質量とコア半径を**3%**の精度で制約できることがわかった。さらにcore と外側のNFWのような密度分布の間の遷移半径を、7%の不確かさで検出することができた。

[**goal**] FDMを仮定したときに各物理量をどの精度で決定できるのか調べる。

[**originality**] Proper motionを用いたJeans解析

[**method & result**]

DM:Core+NFW, 星:Plummerを仮定しJeans方程式からMock data作成

星の3次元速度を用いて尤度を定義し、MCMC解析(NUTS)→パラメータ推定

尤度 $p_i = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2}[\boldsymbol{v_i}-\langle\boldsymbol{v}\rangle(r_i)]^T C^{-1}(r_i)[\boldsymbol{v_i}-\langle\boldsymbol{v}\rangle(r_i)]\right\}}{\sqrt{(2\pi)^3|C(r_i)|}}$, $C(r) = \Sigma(r) + S(r)$

$\Sigma(r)$: 速度の情報を持つ行列　$S(r)$: 観測誤差の情報を持つ行列

表1: Parameterの説明

表2: 推測するパラメータのPrior

図2: $N_* = 2000, \sigma_v = 3\mathrm{km/s}$ の時の推測パラメータ二次元等高線。

赤:真値、オレンジ:68,95,99%信頼区間contour

r_sは決まらない。m_ψ, r_c は縮退

図3: 星の数と観測誤差ごとのMCMC解析の結果。横軸は星の数N_*

m_ψ, r_c は$N_* \geq 2000, \sigma_v \leq 3\mathrm{km/s}$で3%程度の精度で制限を掛けられる。

[**コメント**]

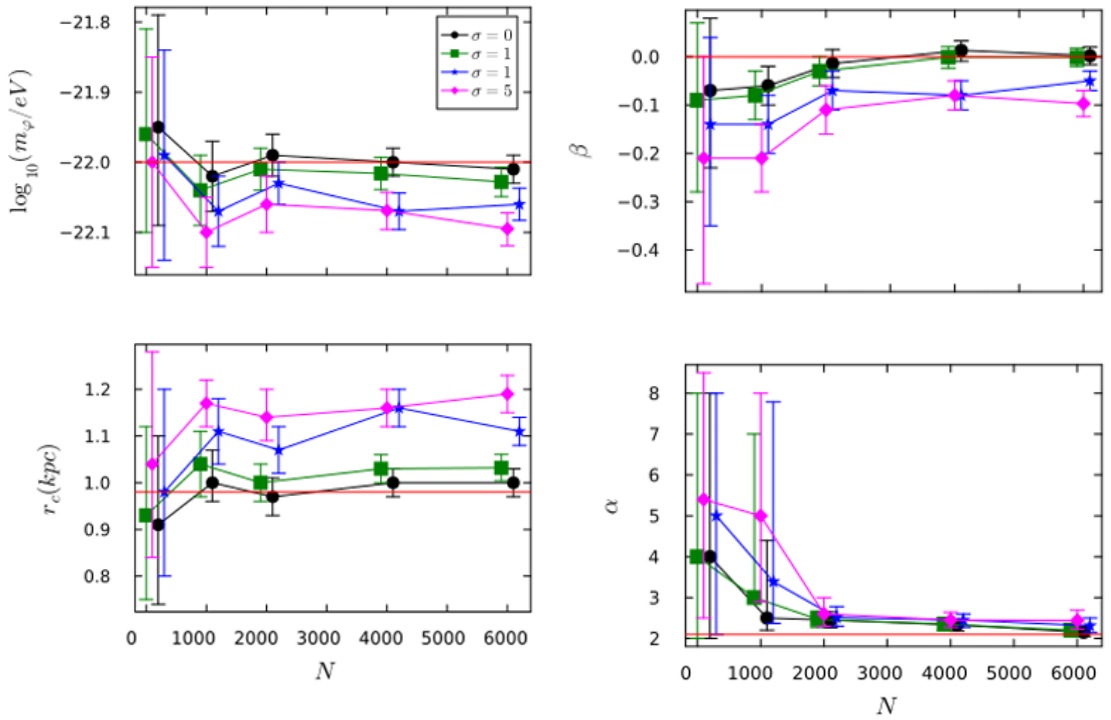
・Mock dataは速度の2次モーメントの情報しか入っていない。

・$N_* = 300, N_* = 500$ とかでやると、$N_* = 100$のときと比べてどう変わるか

表1

Parameter	Description	Input Value	Unit	
N_*	Total number of stars sampled	[100, 1000, 2000, 4000, 6000]	-	Known
a	Scale Factor for the Plummer Distribution	0.296	kpc	Known
m_φ	Mass of FDM particle	10^{-22}	eV	Inferred
r_c	Scale parameter of the Solitonic profile	0.98	kpc	Inferred
β	Anisotropy parameter	[0.25, 0.0, -0.25]	-	Inferred
α	Transition parameter between the profiles	2.1	-	Inferred
r_s	Scale parameter for the NFW profile	3	kpc	Inferred
σ_v	Instrumental error on the velocity components	[0.0, 1.0, 3.0]	km/s	Known

図3



解析の流れ

位置はPlummer分布、速度分布は

$$p = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2}[\boldsymbol{v} - \langle \boldsymbol{v} \rangle(\boldsymbol{x})]^T \Sigma^{-1}(\boldsymbol{x})[\boldsymbol{v} - \langle \boldsymbol{v} \rangle(\boldsymbol{x})]\right\}}{\sqrt{(2\pi)^3 |\Sigma(\boldsymbol{x})|}}$$

で星をばらまいて作ったMock dataを尤度

$$p_i = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2}[\boldsymbol{v_i} - \langle \boldsymbol{v} \rangle(r_i)]^T C^{-1}(r_i)[\boldsymbol{v_i} - \langle \boldsymbol{v} \rangle(r_i)]\right\}}{\sqrt{(2\pi)^3 |C(r_i)|}}$$

でMCMC解析

表2

Parameters	Priors
$\log_{10}(m_\varphi/eV)$	U(-24,-17)
r_c	U(0.4,4)
β	U(-5,0.99)
α	U(2,10)
r_s	U(2,10)

図3

