# *ClearPotential: Revealing Local Dark Matter in Three Dimensions* (Eric Putney, David Shih, Sung Hak Lim, Matthew R. Buckle, 2025)


[arXiv:2512.09989]

## 【Abstract】

*Gaia* DR3 の Red Clump (RC) 星（太陽から 4 kpc 以内）の6次元位相空間分布を用い、平衡 collisionless Boltzmann equation (CBE) を満たすようにニューラルネットをトレーニングし **重力ポテンシャル $\Phi(\vec{x})$ を3次元でデータ駆動推定**する手法：`ClearPotential` を開発した。観測カタログの欠測（ダスト消光・クラウディング等）を位置依存の効率関数 $\varepsilon(\vec{x})$ として同時に学習し、ポテンシャル・加速度・質量密度の連続的なfitting結果を与えた。局所DM密度（球対称平均）を $\rho_\odot(r_\odot) = (0.32 \pm 0.03)\ \mathrm{GeV/cm^3}$ と求め、ハロー形状（tilted/oblate）や dark disk に強い制限を与えた。

## 【Goal/Originality】

- **Goal**：太陽近傍（4 kpc球）で $\Phi(\vec{x})\cdot\vec{a}(\vec{x})\cdot\rho(\vec{x})$ を高解像度に推定し、局所DM分布を制限する。
- **Originality**：
  - 対称性仮定・特定関数形・ビニングに依らない（$\Phi$ をNNで表現）
  - ダストによる選択効果を $\varepsilon(\vec{x})$ として **内部で同時補正**（外部ダストマップに非依存）
  - 従来の機械学習手法の問題点（$\vec{a}$がcurlを持ちうる）を、$\Phi$ を機械学習モデルとすることで解消

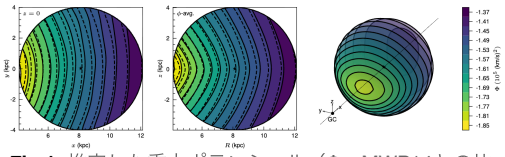


**Fig.1**: 推定した重力ポテンシャル（Φ；MWP14との比較）

## 【Method】

- **Data**：*Gaia* DR3：parallax精度 $\Delta\varpi/\varpi < 1/3$、completeness $M_G + \mu(4\,\mathrm{kpc}) < 14 \rightarrow$ bright stars $\sim 5.8\times10^6$
- **機械学習１（密度推定）**：normalizing flow (MAF) で観測サンプル $f_{\rm obs}(\vec{x},\vec{v}) = n_{\rm obs}(\vec{x})\,p_{\rm obs}(\vec{v}|\vec{x})$ を学習（fitting）
- **機械学習２（CBE最適化）**：$f_{\rm obs} = \varepsilon(\vec{x}) f_{\rm corr}$ として、$\Phi(\vec{x})$ と $\varepsilon(\vec{x})$ を観測効果入りCBEで同時に学習：
  $$\vec{v}\cdot\nabla_{\vec{x}}\ln f_{\rm obs} - \vec{v}\cdot\nabla_{\vec{x}}\ln\varepsilon - \nabla\Phi\cdot\nabla_{\vec{v}}\ln f_{\rm obs} = 0$$
- **DM密度計算**：$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho$。baryon（MWP14, galpy）を差し引きDM密度を計算（Fig.1:$\Phi(\vec{x})$,Fig.5:$\rho(\vec{x})$）
- **系統/非平衡チェック**：binary pulsar のLOS加速度と比較、NS指標でdisequilibriumを評価（Fig.3）

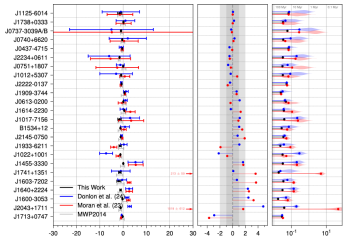



**Fig.3**: バイナリパルサーのLOS加速度との比較とdisequilibrium指標

## 【Main Results】

- **太陽位置の加速度（Galactocentric）**：$\vec{a}_\odot = (-6.56\pm0.04,\ 0.31\pm0.03,\ -0.12\pm0.03)\ \mathrm{mm/s/yr}$
- **局所DM密度（球対称平均）**：$\rho_\odot(r_\odot) = (0.84\pm0.08)\times10^{-2}\ M_\odot/\mathrm{pc^3} = (0.32\pm0.03)\ \mathrm{GeV/cm^3}$
  - localな密度はバリオンの不定性が大きい：$\rho_\odot(\vec{x}_\odot) = (-1.71\pm1.43)\times10^{-2}\ M_\odot/\mathrm{pc^3}$
- **ハロー構造**：スケール半径短め、若干coreっぽい？（Ou+(2023)のMW回転曲線の解析結果？）
  - **Triaxiality**: tilted/oblate っぽい（例：$\xi_1 \sim 0.89$, $\xi_2 \sim 0.33$、pitch $\sim 52^\circ$）
- **Dark disk制限**：SIDMが予言するdark diskに対して先行研究より強い制限
- **非平衡の兆候**：$a_\phi \neq 0$ 等の小さな非対称が見える（真に非対称？ or ダスト補正の限界？）

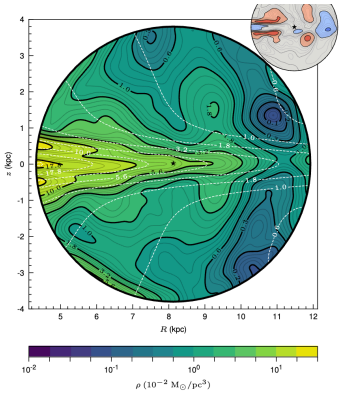


**Fig.5**: 全質量密度（位置依存；R–z 平面、MWP14比較）

## 【Comments】

- バリオン分布の推定精度向上？/球対称仮定の値をどのくらい信じるべきか？
- 一週間前で似た論文がある（Kalda,Green(2025)：$p(v|x)$だけ学習しselectionの問題を回避、Mockで検証）。差は？
- 他の方向性：GalaxyScore：Score matchingでCBEを満たすDFを学習→矮小銀河の動力学解析？