“Confronting the Diversity Problem: The limits of Galaxy Rotation Curves as a tool to Understand Dark Matter Profiles” Sands, Hopkins, et al. 2024 (arXiv:2404.16247)

GAゼミ@20241107 林航平

【アブスト】

銀河の回転曲線はダークマター密度分布を推定する最も有力な方法の１つである。近年のHIガス観測に基づく回転曲線データには、ΛCDM (+ feedbacks)シミュレーションでは再現できないほどの多様性が存在しており、diversity problemとして議論が活発に行われている。本研究ではFIRE simulationで得られたisolatedな銀河を用いて、HIガスの回転曲線がDM密度分布を反映した真の回転曲線を再現できるのかを調べた。その結果、HIガスが豊富でwell-ordered diskであれば~10%程度の誤差となる一方で、非力学平衡、非円運動、強磁場等の影響を受けた銀河の場合は真の回転曲線から５０％以上のズレが生じることがわかった。特にdiversity problemの発端となっている銀河(IC2574, UGC5721, UGC8837)は、それらの影響で説明できることを示した。

【ゴール】

Diversity problemの解決

【オリジナリティ】

高解像度シミュレーションを用いてHIガス回転曲線観測における様々な影響を調べた。

【ロジック】

- FIRE-3から$M_* = 10^8 - 10^9 M_\odot$の孤立系矮小銀河を15個抽出（表1）。活発な星形成をしているものや、強い磁場を持つものなど。
- 回転曲線の計算は以下の式：

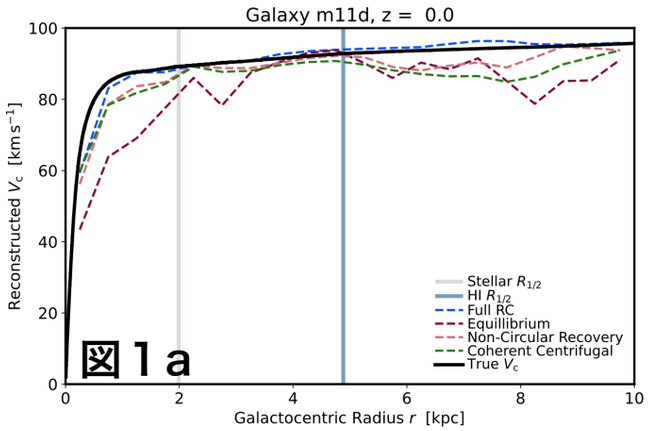
$$-\nabla\Phi \equiv \mathbf{a}_{\rm grav} \equiv \frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial(\rho\mathbf{v})}{\partial t} + \nabla\cdot\mathbf{\Pi}^* - \mathbf{S}_{\rm ext}\right] \qquad \mathbf{\Pi}^* \equiv \mathbf{\Pi}_{\rm kin} + \mathbf{\Pi}_{\rm mag} + \mathbf{\Pi}_{\rm therm} + \mathbf{\Pi}_{\rm visc} + \mathbf{\Pi}_{\rm cr}$$

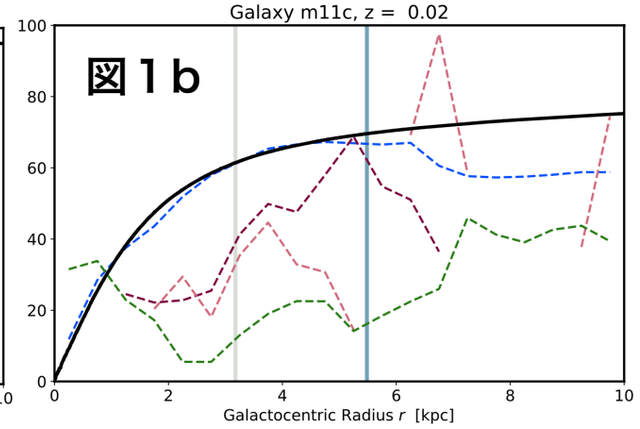
を用いるが、いくつか制限を課して計算を行う。

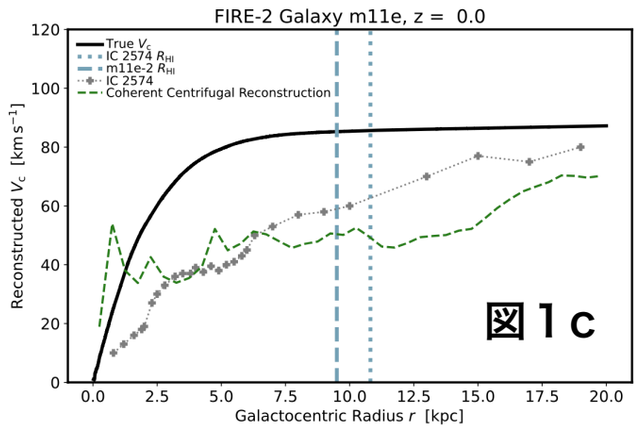
1. Full RC：上式をそのまま使用
2. Equilibrium：時間変化の項を落とす
3. Non-Circular Recovery：kinetic以外のテンソルを全部無視
4. Coherent Centrifugal：v_ϕ成分のみ観測可

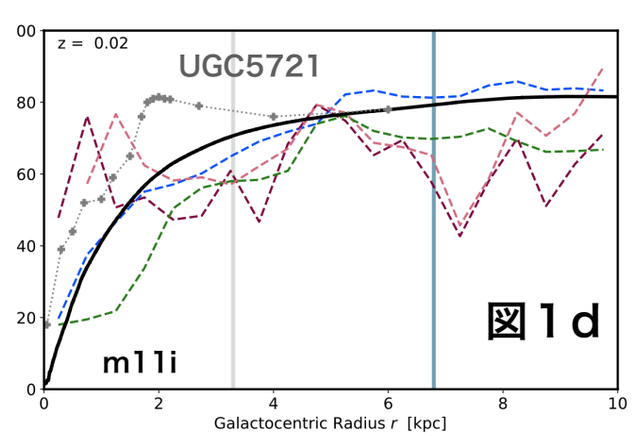
◆ 結果

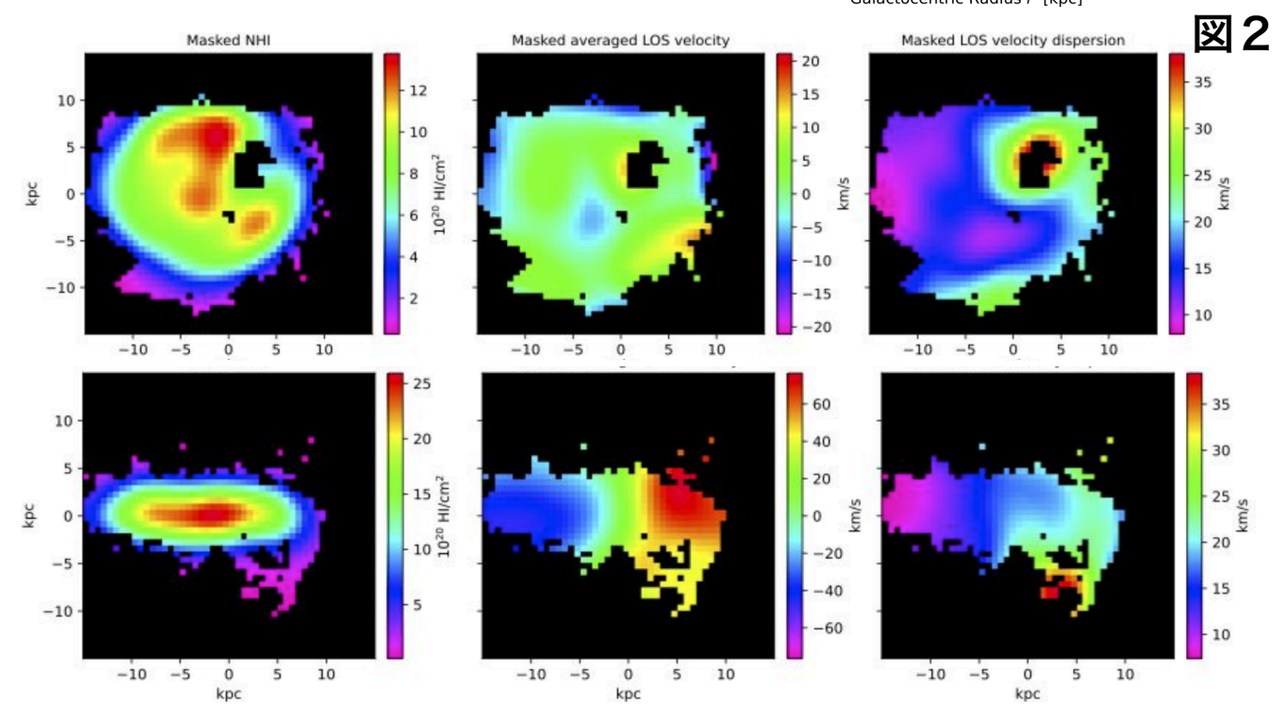
- 図1a,b：simulated銀河の回転曲線。aはどの制限でも真の回転曲線を良く再現できている。これはHIガスが十分にあって、その運動が綺麗な回転運動をしているから。bは再現できておらず、過小評価している。この要因は強い磁場であると主張。
- 図1c,d：simulated銀河と実際の銀河の回転曲線を比較した図。cはIC2574とCentrifugalで計算した回転曲線の振る舞いが良く合っているが、真の回転曲線からは大きく異なる。dはUGC5721とNon-Circular Recoveryを比較すると似たような傾向を持つ。
- m11eはmergerや活発な星形成をしている銀河でCentrifugalのみで回転曲線を求めると過小評価してしまう。
- m11iは銀河中心付近でのfeedbackによって一時的に回転速度が大きくなっている。実際の観測では時間進化は追えないので、このようなtransientな特徴を捉えているのでは？
- 図2：HIガスの密度(左)、視線速度(中)、視線速度分散(右)をface-on(上)とedge-on(下)でプロットしたもの。face-onで見れば大きなHIホールがあり回転曲線の推定に適さないのだが、edge-onでだとHIホールが同定できず、回転曲線推定のサンプルに選択される。つまり、現状の観測データから回転曲線推定に不適切な銀河を取り除くことは容易ではない。











【コメント＆感想】

- 少なくともdiversity問題の発端となる銀河は解析から取り除いた方が良さそう。
- 回転曲線ではない、別の物理量は使えないのか（速度分散？）。

表 1

Name	$r_{\rm vir}$ (kpc)	$M_{\rm halo}$ ($M_\odot$)	M_* ($M_\odot$)	$M_{\rm HI}$ ($M_\odot$)	HI disk morphology	RC success
Classical Dwarfs						
m10q	230	7.9×10^9	9.1×10^6	5.9×10^3	Insufficient HI	N/A
m10v	230	8.3×10^9	4.1×10^6	17	Insufficient HI	N/A
m10b	230	9.2×10^9	1.0×10^7	2.9×10^5	Small, puffy disk	Deviates due to thermal pressure
Bright Dwarfs						
m11a	230	2.9×10^{10}	3.5×10^8	2.7×10^6	Non-disky	Deviates due to non-circular motions
m11b	230	3.3×10^{10}	6.1×10^8	7.9×10^6	Small, puffy disk	Accurate within disk
m11v	230	4.6×10^{10}	8.2×10^8	2.3×10^7	Small, puffy disk	Accurate within disk
m11i	240	5.0×10^{10}	2.8×10^9	2.1×10^8	Turbulent disk	Deviates due to bursty star formation
m11c	230	8.1×10^{10}	5.1×10^8	6.4×10^6	Non-disky	Deviates due to strong B-fields
m11e	240	8.4×10^{10}	3.0×10^9	1.0×10^8	Disk w/ tidal features	Deviates due to merger
m11q	230	8.5×10^{10}	2.0×10^9	1.2×10^5	Small, puffy disk	Deviates due to non-circular motions
m11e-2 [a]	270	8.7×10^{10}	1.6×10^9	1.0×10^9	Disk w/ tidal features	Deviates due to merger
m11h	270	1.0×10^{11}	6.1×10^9	7.9×10^6	Small, puffy disk	Accurate within disk
m11d	240	1.1×10^{11}	4.7×10^9	3.8×10^5	Ordered disk	Accurate to within $\sim 10\%$
m11f	270	2.1×10^{11}	5.9×10^9	1.3×10^8	Ordered disk	Accurate to within $\sim 10\%$
m11g	300	2.2×10^{11}	1.5×10^{10}	2.0×10^8	Ordered disk	Accurate to within $\sim 10\%$
Milky Way Analog						
m12i	370	4.6×10^{11}	3.6×10^{10}	3.3×10^9	Ordered disk	Accurate to within $\sim 10\%$