“Off-centred dark matter halo leading to strong central disc lopsidedness”

Chaitanya Prasad and Chanda J. Jog arXiv:1610.01702

GAゼミ＠20161115 本間大輔

【アブスト】

銀河系タイプの銀河において、ダークマターハローの中心は銀河円盤の中心から数100pcほどずれているということが、近年シミュレーションと観測から分かっている。この論文では、このような銀河の中心の数kpc以内の星・ガスの軌道と運動を理論的に計算した。結果、中心のずれから生じる摂動ポテンシャルによって数kpc以内の星・ガスの運動は中心がずれていない場合いに比べて大きく変わることが分かった。例えば、$R_0 = 1.5$kpcの摂動半径は~40%であり、摂動ポテンシャルが中心の星・ガスの軌道に強く影響する。この結果は、銀河中心の力学進化の理解において重要である。

【ゴール】

ダークマターハローと銀河円盤の中心のずれが中心の星・ガスの運動に対して及ぼす影響を考える

【オリジナリティ】

中心がずれているときに生じる摂動の影響を理論的に計算した

【ロジック】

Model

銀河円盤とダークマターハローの形

Exponential disk:$\Sigma(R) = \Sigma_0 \exp(-R/R_D)$　　Σ_0:中心表面密度　R_D:diskのscale length

Pseudo-isothermal halo:$\rho(r) = \rho_0/[1 + (r^2/R_C^2)]$　　ρ_0:中心密度　R_C:haloのcore radius

点Pのポテンシャルは、銀河円盤とダークマターハローが作るポテンシャルをそれぞれΦ_D, Φ_Hとして

$$\Phi = \Phi_D + \Phi_H = \Phi_D + \Phi_H(d = 0) + \Phi_{pert}$$　（詳細は裏面参照）

このように中心のずれによって摂動項Φ_{pert}が生じ、$\Phi_{pert}(R, \phi) = \Psi(R)\cos\phi$という形で書ける。

この摂動ポテンシャルがどのように星・ガスの軌道や運動へ影響するかを調べる。

Result

$\Sigma_0 = 640.9 M_\odot\,\mathrm{pc}^{-2}, R_D = 3.2\mathrm{kpc}, \rho_0 = 0.035 M_\odot\,\mathrm{pc}^{-3}, R_C = 5\mathrm{kpc}$という値を用いて、$d = 350$pcとする。

・図2はこのときの摂動ポテンシャルの強さ$\varepsilon_{pert} = \Psi(R)/(\Phi_d + \Phi_h)$を表す。

・図3aは、摂動なしのとき$R_0 = 1.5$kpcのclosed orbitをするとき、摂動によって軌道半径が変わる様子(Rvsϕ)
図3bはその軌道の様子。図3c,dはそのときの回転速度($v_\phi$vsϕ)とR方向の速度($v_R$vsϕ)の様子

⇒$R_0 = 1.5$kpcの摂動ポテンシャルの強さは図2より$\varepsilon_{pert} = 0.005$程度だが、軌道半径は最大~40%も変化

・図4は、$\phi = 0°$方向で、Disk,Halo,摂動それぞれのポテンシャルによって生じる回転速度v_ϕの様子

⇒1.5kpcより内側で摂動の影響が急激に強くなり、軌道は銀河の回転とは逆回転になり、
R方向の運動の摂動は大きくなるので、もはやradial orbitに近くなる。

・図5は、$R_0 = 1.5, 2, 2.5, 3$kpcの軌道の様子

⇒内側ほど摂動の影響は強くて、軌道が歪められる。

Discussion

ダークマターハローと銀河円盤はお互い移動せず、ずれの距離dは長い間変化しないと仮定すると、中心の星やガスの軌道の歪みも長い間続く。そこから、以下のような2つの考察ができる。

①摂動による軌道の歪みによって、ガスの角運動量は外側へ輸送され、
ガスは中心に落ちていきAGNを太らせるか？

②Rが小さい内側ではradial orbitに近くなるので、triaxialな構造、つまりbarを形成させるか？

【コメント】

・$R < 1.2$kpcでは線形近似($d \ll R$)が成り立たないので注意。

・ダークマターハローの中心が銀河平面に対してz方向にずれている場合は？

図1

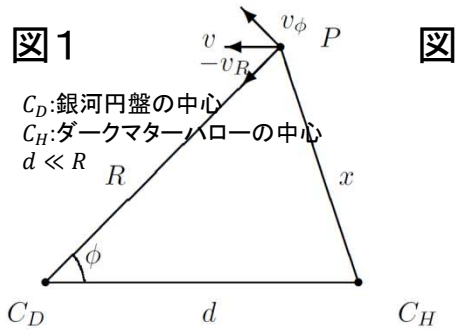


図2

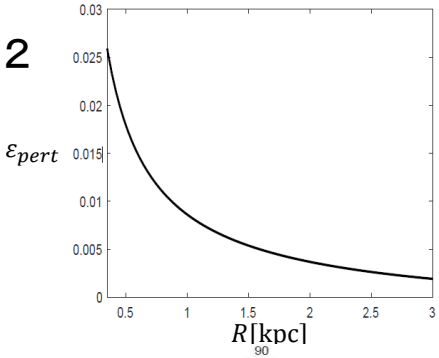


図3a

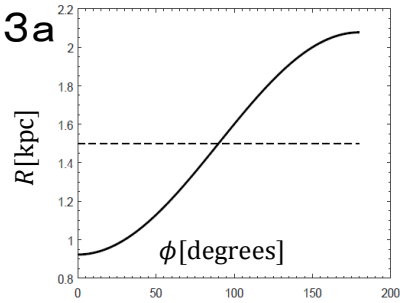


図3b

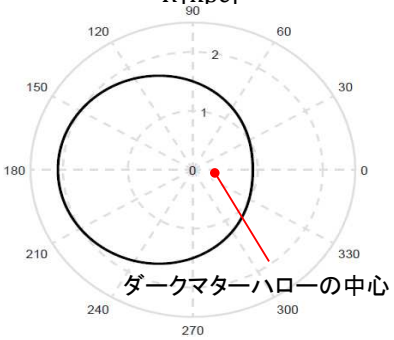


図3c

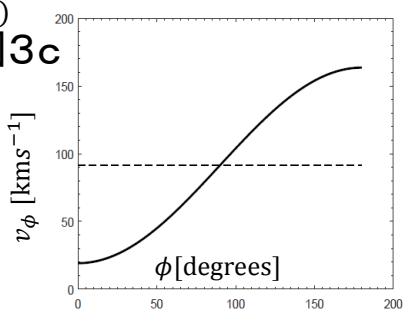


図3d

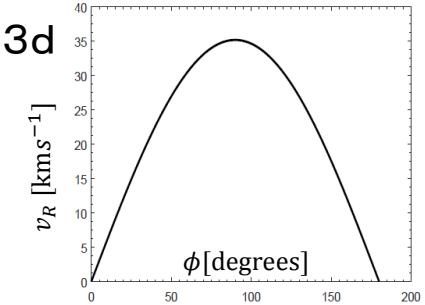


図4

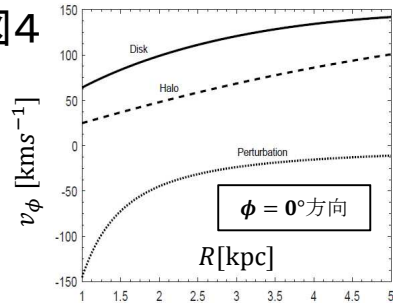
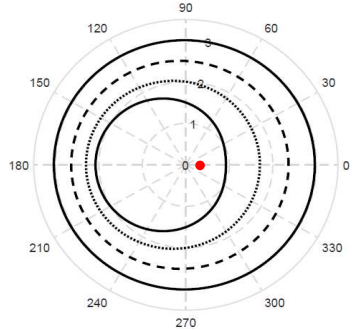


図5



①摂動ポテンシャルについて

ポアソン方程式を解くことで、点Pに銀河円盤が作るポテンシャル

$$\Phi_D = -\pi G\Sigma_0 R[I_0(y)K_1(y) - I_1(y)K_0(y)] \quad where \quad y \equiv \frac{R}{2R_D}$$

$d = 0$のとき、ダークマターハローが点Pに作るポテンシャル

$$\Phi_H(d=0) = 4\pi G\rho_0 R_C^2\left[\frac{\log(R_C^2+R^2)}{2} + \frac{R_C}{R}\tan^{-1}\frac{R}{R_C} - 1\right]$$

中心同士が距離dだけずれているとき、

$$\Phi_H = 4\pi G\rho_0 R_C^2\left[\frac{\log(R_C^2+x^2)}{2} + \frac{R_C}{x}\tan^{-1}\frac{x}{R_C} - 1\right]$$

$d \ll R$より

$$\Phi_H \approx 4\pi G\rho_0 R_C^2\left[\frac{\log(R_C^2+R^2)}{2} - \frac{dR\cos\phi}{R_C^2+R^2} + \frac{R_C}{R}\tan^{-1}\frac{R}{R_C} + \frac{R_C d\cos\phi}{R^2}\tan^{-1}\frac{R}{R_C}\right]$$

$$= \Phi_H(d=0) + 4\pi G\rho_0 R_C^2 d\cos\phi\left[\frac{R_C}{R^2}\tan^{-1}\frac{R}{R_C} - \frac{R}{R_C^2+R^2}\right]$$

$$= \Phi_H(d=0) + \Phi_{pert}$$

摂動項について

$$\Phi_{pert}(R,\phi) = \Psi(R)\cos\phi \quad where \quad \Psi(R) = 4\pi G\rho_0 R_C^2 d\left[\frac{R_C}{R^2}\tan^{-1}\frac{R}{R_C} - \frac{R}{R_C^2+R^2}\right]$$

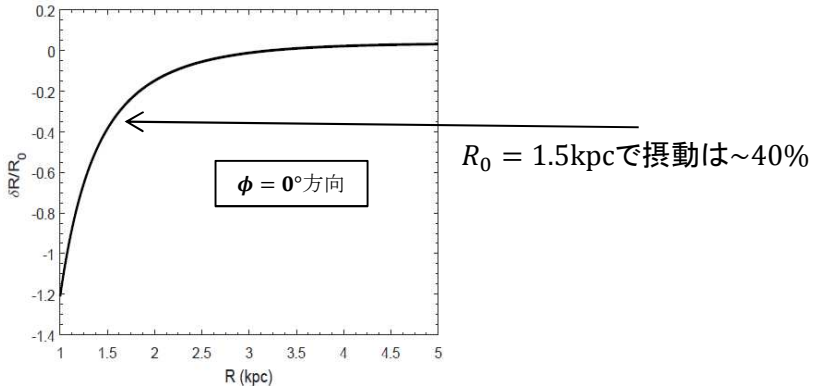
のように書ける。

②摂動によって生じるR方向の速度v_R

$R = R_0$のclosed orbitに生じるR方向の摂動

$$\delta R = -\left(\frac{2\Psi}{R} + \frac{\partial\Psi}{\partial R}\right)_{R_0}\frac{\cos\phi_0}{\kappa^2-\Omega_0^2} = -\frac{d\cos\phi_0}{\kappa^2-\Omega_0^2}\frac{4\pi G\rho_0 R_C^2}{R_C^2+R_0^2}\left(\frac{R_C^2}{R_0^2} + \frac{2R_0^2}{R_C^2+R_0^2} - 3\right)$$

κ: epicycle frequency, Ω_0: $angular\ speed\ at\ R = R_0$



$R_0 = 1.5$kpcで摂動は~40%

したがって、摂動によって生じるR方向の速度は

$$v_R = \frac{dR}{dt} = \frac{d(R_0+\delta R)}{dt} = \frac{d\delta R}{dt}$$

$$= \frac{\sin\phi_0}{\kappa^2-\Omega_0^2}\frac{4\pi G\rho_0 R_C^2 d}{R_C^2+R_0^2}\left(\frac{R_C^2}{R_0^2} + \frac{2R_0^2}{R_C^2+R_0^2} - 3\right)$$

③摂動によって生じるϕ方向の速度δv_ϕ

ϕ方向の運動方程式より

$$R_0\frac{d^2\delta\phi}{dt^2} + 2\Omega_0\frac{d\delta R}{dt} = \frac{\Psi\sin\phi_0}{R_0}$$

時間について積分して

$$R_0\frac{d\delta\phi}{dt} = -2\Omega_0\delta R - \frac{\Psi(R)\cos\phi_0}{\Omega_0 R_0}$$

ここで

$$v_\phi = v_c + R_0\frac{d\delta\phi}{dt} + \Omega_0\delta R$$

$$\rightarrow \quad \delta v_\phi = R_0\frac{d\delta\phi}{dt} + \Omega_0\delta R$$

上の結果を代入して

$$\delta v_\phi = -2\Omega_0\delta R - \frac{\Psi(R)\cos\phi_0}{\Omega_0 R_0} + \Omega_0\delta R$$

$$= -4\pi G\rho_0 R_C^2 d\frac{\cos\phi_0}{\Omega_0}\left[\frac{R_C\tan^{-1}(R_0/R_C)}{R_0^3} - \frac{1}{R_C^2+R_0^2}\right]$$

$$+ 4\pi G\rho_0 R_C^2 d\frac{\cos\phi_0\Omega_0}{\kappa^2-\Omega_0^2}\frac{1}{R_C^2+R_0^2}\left(\frac{R_C^2}{R_0^2} + \frac{2R_0^2}{R_C^2+R_0^2} - 3\right)$$

