

## 円盤銀河におけるバーとハローの相互作用

穂積俊輔 (滋賀大学教育学部)

利用カテゴリ XT4B

### 1 はじめに

昨年度は、本シミュレーションプロジェクトの研究課題で、銀河円盤を無衝突系の極限で定式化し、重力相互作用を softening なしの純粋 Newton 力で計算する SCF (Self-Consistent Field) 法に基づいた計算コードを開発した。本年度は、円盤成分に SCF 法を適用するだけでなく、それを取り囲むハロー成分についても SCF 法でシミュレーションを行う計算コードを開発し、円盤とハローからなる円盤銀河の力学進化を調べた。

### 2 モデルと方法

円盤成分の密度分布は、円盤質量を  $M_d$  として、

$$\rho_d(R, z) = \frac{M_d}{4\pi h^2 z_0} \exp(-R/h) \operatorname{sech}^2\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

で表される exponential disk を用いる。ここで、 $h$  は円盤のスケール長、 $z_0 = 0.2h$ 、半径方向の拡がりを  $R_{\max} = 10h$ 、 $z$  方向の拡がりを  $z_{\max} = 2h$  とする。一方、ハロー成分の密度分布は、

$$\rho_h(r) = \frac{\rho_0}{r/r_s(1+r/r_s)^2} \quad (2)$$

の NFW プロファイルで表されるものとする。ここで、

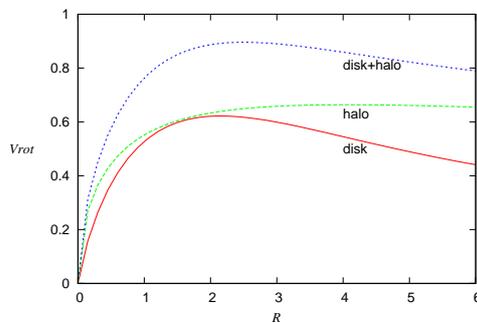


図 1: 各半径における円盤、ハロー、その組み合わせの回転速度への寄与。

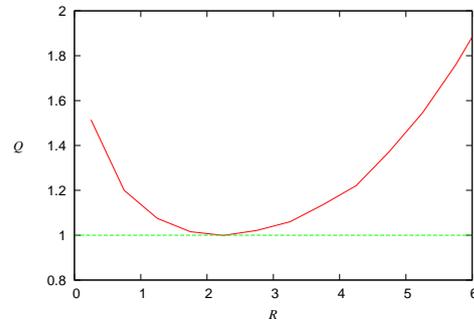


図 2: 円盤の Toomre の  $Q$  プロファイル。太陽半径  $R_{\odot} = 2.43h$  で  $Q = 1$  となるように半径方向の速度分散分布を与えている。

$$\rho_0 = \frac{M_h}{4\pi r_{h,\max}^3} \frac{C_{\text{NFW}}^3}{\ln(1 + C_{\text{NFW}}) - C_{\text{NFW}}/(1 + C_{\text{NFW}})} \quad (3)$$

$$C_{\text{NFW}} = r_{h,\max}/r_s \quad (4)$$

であり、ハロー質量  $M_h = 5 M_d$ 、ハローの拡がり  $r_{h,\max} = 15 h$ 、 $C_{\text{NFW}} = 8$  とした。図1に半径ごとの円盤、ハロー、円盤とハローの組み合わせによる回転速度への寄与を示す。

円盤とハローの密度分布を Hernquist (1993, ApJS, 86, 389) の方法によって、それぞれ、 $N_d = 200,192$  と  $N_h = 1,000,960$  の粒子数でモデルを作成する。その際、太陽半径  $R_\odot = 2.43 h$  における Toomre の  $Q$  を  $Q = 1$  となるように半径方向の速度分散分布を与える (図2参照)。なお、比較のために、ハローは外場の場合も計算した。

計算の単位系は、 $G = M_d = h = 1$  を採用した。ここで、 $G$  は Newton の万有引力定数である。私たちの銀河系に基づいて、 $M_d = 5.6 \times 10^{10} M_\odot$ 、 $h = 3.5 \text{ kpc}$  として物理単位に換算すると、時間の単位は  $13.1 \text{ Myr}$  となる。

円盤成分に対して、最大展開項数は、半径方向に  $n_{d,\max} = 64$ 、方位角方向に  $m_{d,\max} = 24$ 、 $z$  方向に  $l_{d,\max} = 24$  とした。一方、ハロー成分に対して、最大展開項数は、半径方向に  $n_{h,\max} = 24$ 、角度方向に  $l_{h,\max} = m_{h,\max} = 6$  とし、直交基底関数系のスケール長  $a_h$  を  $a_h = 4$  とした。

### 3 結果

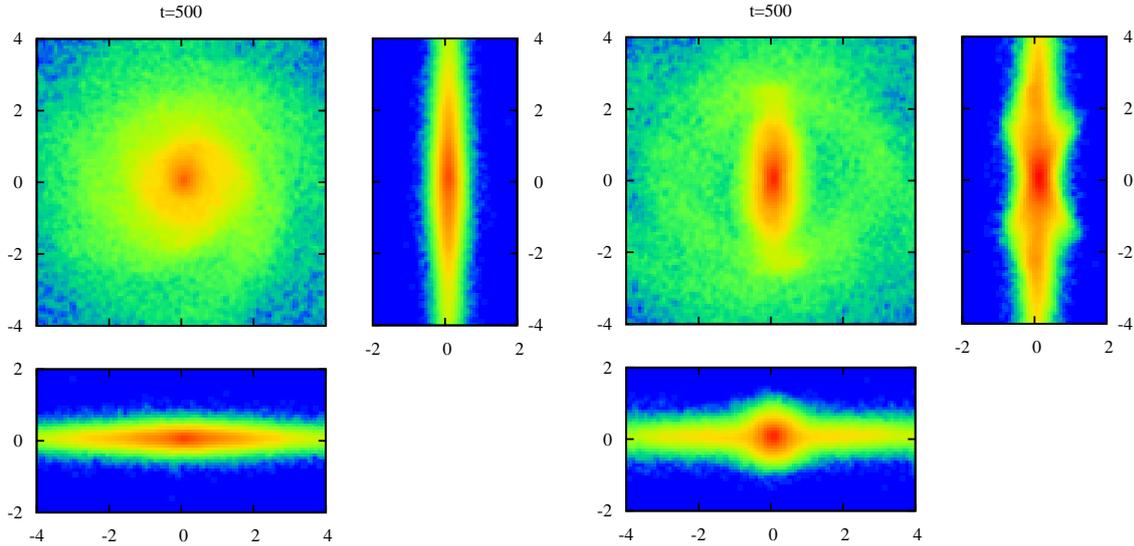


図 3:  $t = 500$  における外場中の円盤の正面と、側面の 2 方向から見た投影された密度分布。バーは形成されておらず、fire-hose 不安定も起きていない。

図 4:  $t = 500$  における自己重力ハロー中の円盤の正面と、バーの長軸と短軸方向から見た投影された密度分布。バーが形成されるとともに、fire-hose 不安定により、擬似バルジが形成されている。

最終状態 ( $t = 500$ ) における円盤の投影された密度分布を図 3(外場ハロー) と図 4(自己重力ハロー) に示す。外場ハローでは、基本的に初期円盤の軸対称な表面密度分布が維持さ

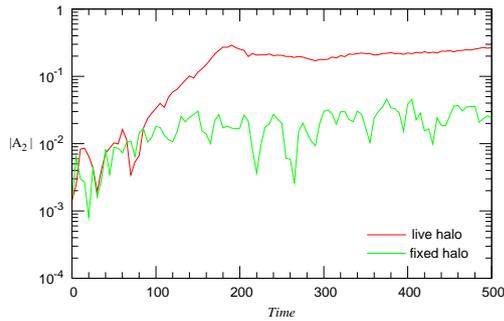


図 5: バー (2 本腕モード) 振幅の時間進化。赤の実線は自己重力ハロー中の円盤におけるバー振幅を示し、緑の実線は外場ハロー中の円盤におけるバー振幅を示す。

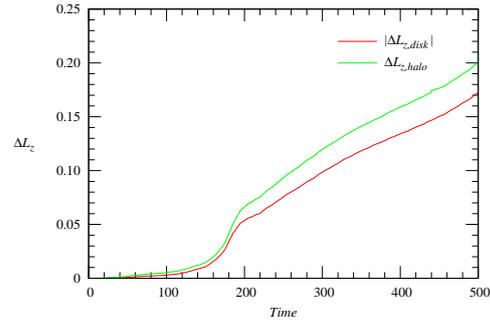


図 6: 自己重力ハローにおける、円盤とハローの総角運動量の時間進化。赤の実線は円盤の総角運動量で、符号は本来はマイナスである。緑の実線はハローの総角運動量である。

れており、バー不安定によるバーは形成されていない。さらに、2 方向の側面に投影した密度分布図からわかるように、fire-hose 不安定も起こっていない。一方、自己重力ハローの場合は、バー不安定によってバーが形成され、fire-hose 不安定も起こって、バー長軸方向から見るとピーナッツ状の構造を示し、バー短軸方向から見ると球状になっていることがわかる。これらは、擬似バルジの特徴となっている。図 5 に示すように、ハローが外場の場合、不安定な 2 本腕モードは初期に比べて数倍程度は成長するものの、バー不安定を起こすまでには至らず進化するのに対して、自己重力ハローでは、不安定な 2 本腕モードが指数関数的に振幅を増大させ、バー形成時には初期に比べて 2 桁以上成長している。バー振幅の時間進化からも、自己重力ハローによってバーが励起されていることがわかる。

図 6 に、円盤とハローの総角運動量の時間進化を示す。この図で、円盤の総角運動量は符号を変えて表示している。この図から、円盤は常に角運動量を失っていることがわかる。一方、ハローは初期には全体として回転していなかったが、時間とともに円盤から角運動量を得て回転するようになる。円盤が失った角運動量とハローが得た角運動量の差は、バーに伝達されたと考えられる。

本研究の結果は、基本的に Athanassoula (2002, ApJ, 569, L83) が exponential disk とほぼ等温なハローからなる系に対して得られたものと同等である。したがって、ハローの密度分布が宇宙論的シミュレーションで示された NFW プロファイルに対しても、外場としてバー不安定を抑えるくらいの大質量ハローであっても、自己重力ハローとして扱った場合はバー不安定を抑えることはできず、むしろバーを励起するという結果が得られた。

## 4 まとめ

円盤だけでなく、ハローも SCF 法で計算できるシミュレーションコードを開発した。そのコードを使って円盤とハローからなる系のシミュレーションを行った。ハローモデルとして NFW プロファイルを採用しても、ハローによってバーが励起されることを確かめた。そのようなバーは fire-hose 不安定を受けて、擬似バルジとなることも示すことができた。