

銀河の渦巻パターン形成についての簡易シミュレーション

石坂 千春 *

概要

プラネタリウム投影プログラム「銀河うずうず」での解説のため、銀河の渦巻パターンを再現する簡易シミュレーションを行った。銀河の渦巻パターンの主因は「密度波理論」によって説明される。簡単のため、銀河を多体系ではなく、2次元点対称重力場中を公転する粒子(恒星)の集合として扱い、初期状態の点対称重力場に対し、点対称のパーターベーション重力場(近接銀河による潮汐力を想定)を加えると、粒子の軌道が変化し、渦状の高密度領域が現れた。初期状態の点対称重力場の形状および追加重力場の運動を変えると、現れる渦巻パターンも変化することが確かめられた。

1. はじめに

2020年春季のプラネタリウム投影プログラム「銀河うずうず」[1]では美しい渦巻銀河の姿を紹介した。

我々の天の川銀河も中心部が長細い樽のような形をした棒渦巻型だと考えられている。

銀河が渦を作るメカニズムとして有力なのは「密度波」理論である[2]。簡単に言えば渦そのものは実体を持ったものではなく、恒星が渋滞している場所である、という考え方である。高速道路の渋滞は決まった場所に行けるが、車は常に入れ替わっている。銀河の場合、あるきっかけによって恒星が渋滞する場所が形成されると、銀河自体の回転によって、渋滞する場所が「渦」を巻くことになる。

密度波理論を確かめるために、単純化したシミュレーションをしたので報告する。

2. 計算方法

2-1. モデル銀河

初期状態として恒星は円軌道で反時計回りに公転しているという設定にし、簡単のため、銀河は多体系(自己重力系)ではなく、点対称重力場を仮定した。点対称重力場としては、半径に比例してダークマター質量が増加する「フラットローテーション型」(以下、Fモデル)と、中心に質量が集中する「ケプラー型」(以下、Kモデル)の2種類を設定した。

多くの渦巻(円盤)銀河では、太陽系のように中心部に質量が集中し、外縁に行くほど回転速度が下がるケプラー型ではなく、外縁部まで公転速度がほぼ一定(角速度が半径に反比例)のフラットローテーション型であることが分かっている。これは、ほぼ密度一定のダークマターがハロとして銀河を取り巻いていることを意味している。本研究では、フラットローテーションとケプラー型とで、渦巻パターンが異なるか確かめた。

計算では、簡単のため重力定数 $G=1.0$ とする単位系を用いた。

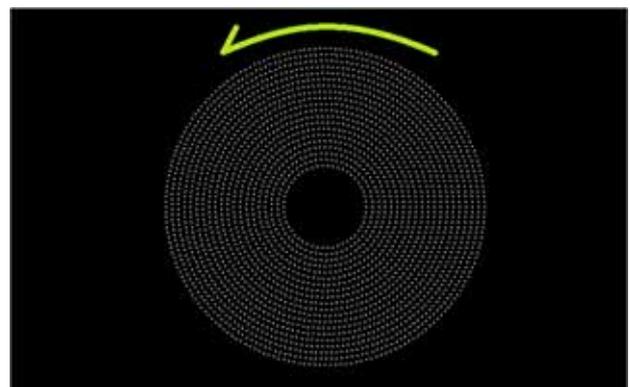


図1. 初期状態

与えられた重力場に応じた速度で反時計方向に回転する粒子群。粒子は $r=1.0\sim 4.0$ に等間隔に配置した。粒子総数は 2420 である。粒子の初速度は、Fモデル、Kモデルそれぞれに対応する円軌道上の公転速度を与えた。

*大阪市立科学館/中之島科学研究所
ishizaka@sci-museum.jp

モデル銀河は2次元平面上にあるとし、半径 r 方向の質量分布 $M(r)$ は、F モデル、K モデルで、それぞれ以下のとおりである。いずれも、外縁を $r=4.0$ で打ち切っている。

$$\text{F モデル: } M(r)=r \quad (1.0 \leq r \leq 4.0)$$

$$\text{K モデル: } M(r)=4.0 \quad (1.0 \leq r \leq 4.0)$$

また、 r での粒子の公転の初速度 $v(r)$ は、

$$v(r) = \sqrt{M(r)/r}$$

と与えた。

r における公転周期 $T(r)$ は

$$T(r) = 2\pi r \sqrt{r/M(r)}$$

と表されるので、もし $r=4.0$ が4万光年で、 $T(r=4.0)$ が公転周期3億8千万年に相当するとすれば、 $t=1.0$ が約1500万年に相当する。

2-2. パータベーション重力場

前述のモデル銀河(初期状態)に対し近接銀河に相当する重力源(質量は $0.5=$ モデル銀河の 8 分の 1)を2つ、初期外縁の外側($r=\pm 5.0$)に置いて、軌道の変化を調べた。

現実的には近接銀河が左右対称に存在するということはないが、追加重力源によるパータベーション重力場が及ぼす潮汐作用を模すため、2つの等質量重力源を点対称に置いた。

2-3. 積分方法

計算は gfortran(mingw-w64)により実施した。

積分はルンゲ=クッタ(RK4)法を採用し、タイムステップ dt は $dt=0.002$ にとった。

2-4. 図示化

計算結果はtxtデータとして出力し、MS エクセルの「散布図」によって図示化した。

3. 結果

3-1. F モデル銀河の場合

フラットローテーション型(Fモデル)の銀河の場合の形状変化を図2に示す。以下、図中の X 印のところにパータベーション重力源を置いている。

$t=4.0$ (図2a)あたりから軌道が密になった部分が渦巻パターンを形成し始めていることが分かる。

また、Fモデルの場合、パータベーション重力場と垂直方向に棒(棒)構造が $t=10.0$ あたり(図2e)から発展していった(図2f)。最終的に棒渦巻き銀河様のパターンが形成された。

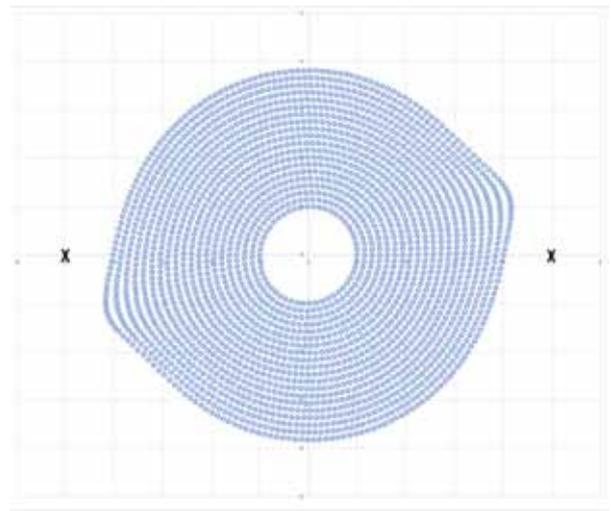


図 2 a . $t=2.0$

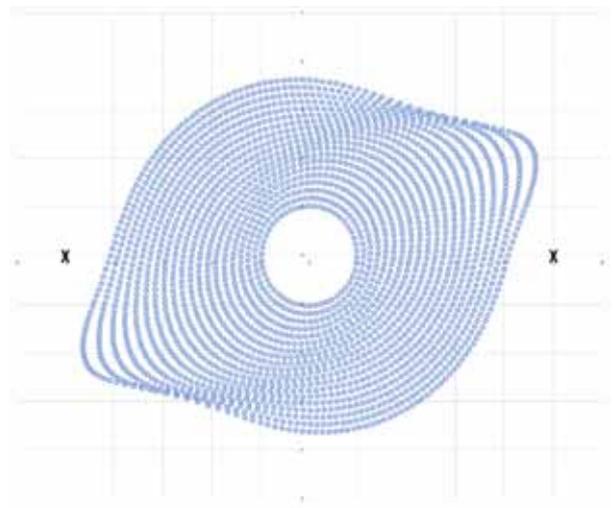


図 2 b . $t=4.0$

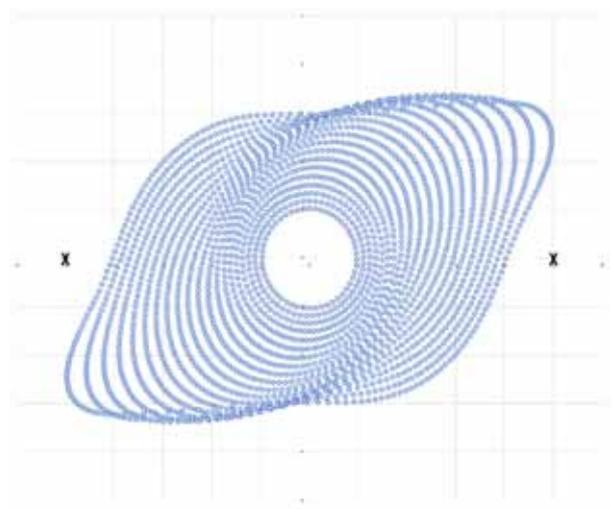


図 2 c . $t=6.0$

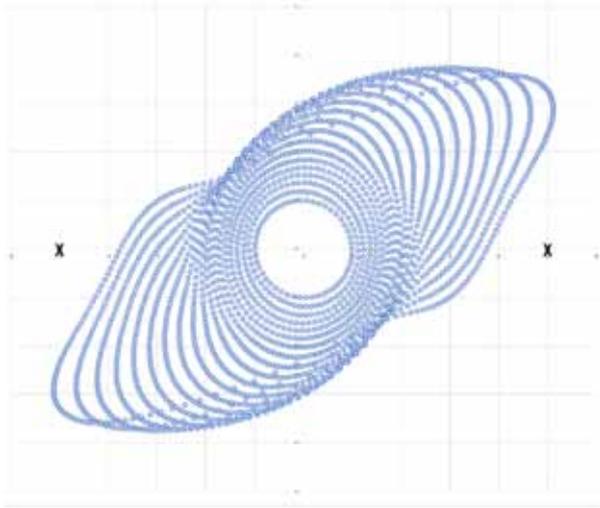


図 2 d . t=8.0

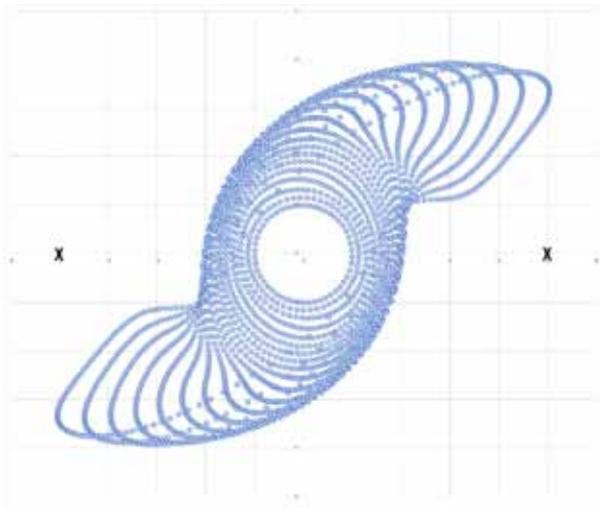


図 2 e . t=10.0

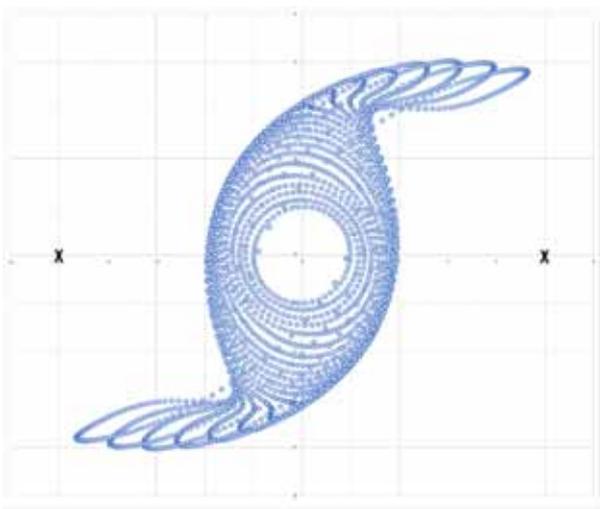


図 2 f . t=12.0

やはり $t=4.0$ (図 3b) あたりから渦巻パターンが成長していき、K モデル銀河の場合は、バー構造は見られなかった。

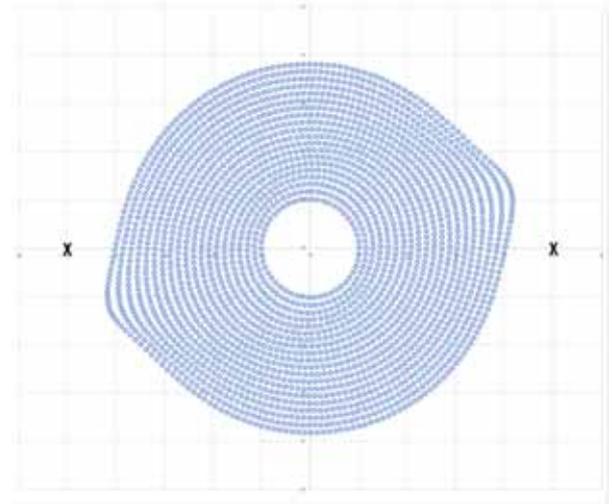


図 3 a . t=2.0

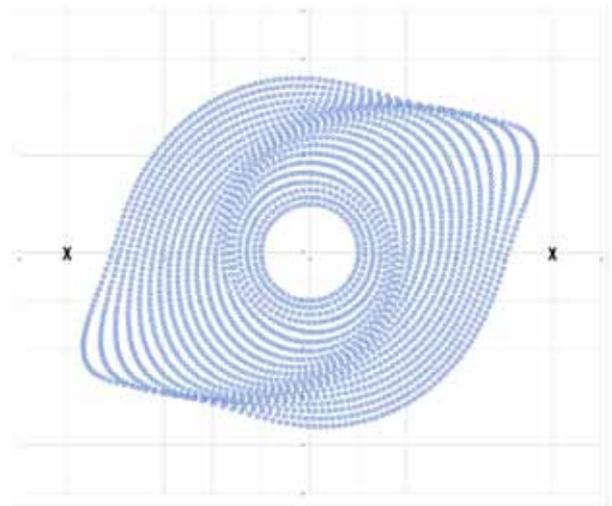


図 3 b . t=4.0

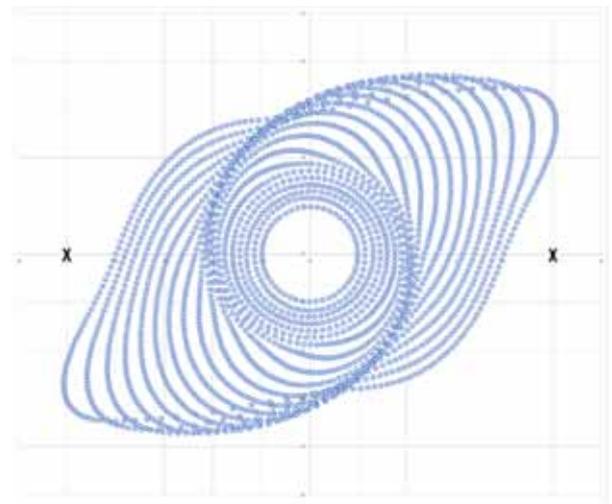


図 3 c . t=6.0

3 - 2 . K モデル銀河の場合

K モデル銀河の場合の形状変化を図 3 に示す。

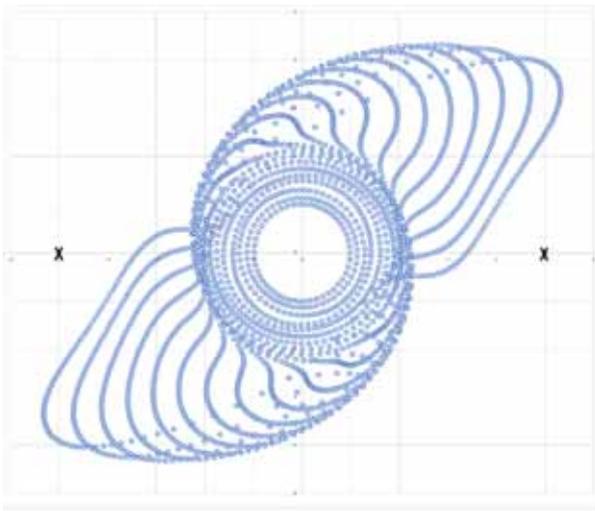


図 3d . t=8.0

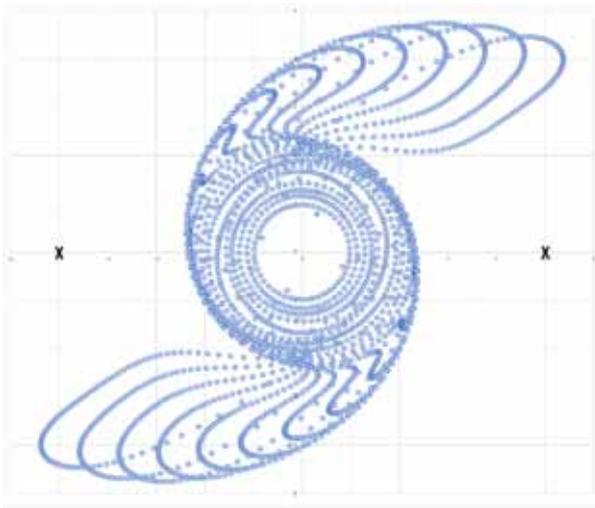


図 3e . t=10.0

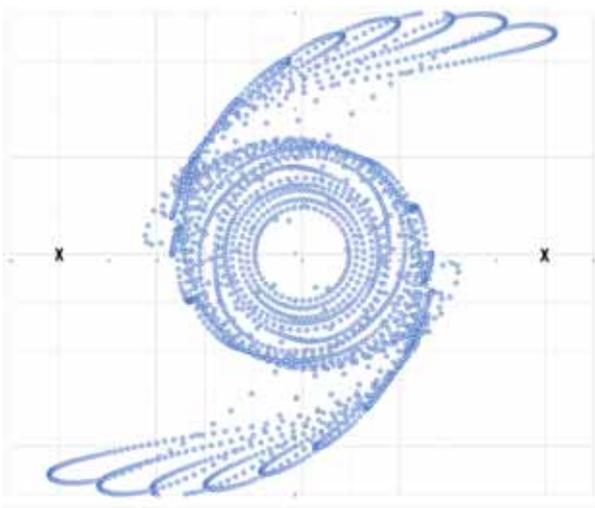


図 3f . t=12.0

3 - 3 . パータベーション重力場が公転する場合

パータベーション重力場(伴銀河)が、母銀河の自転に対して反対方向に公転する場合についても調べた(図4)。銀河回転を相対的に速めたことに相当し、グランドデザイン的な渦パターンが生じた。

(1) F モデル

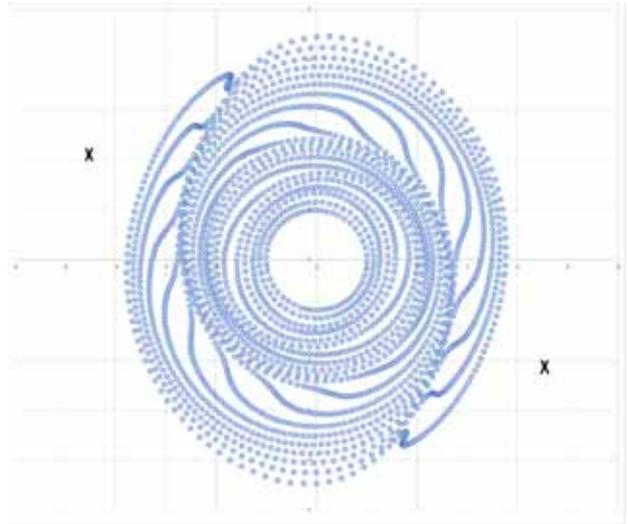


図 4a . t=20.0

(2) K モデル

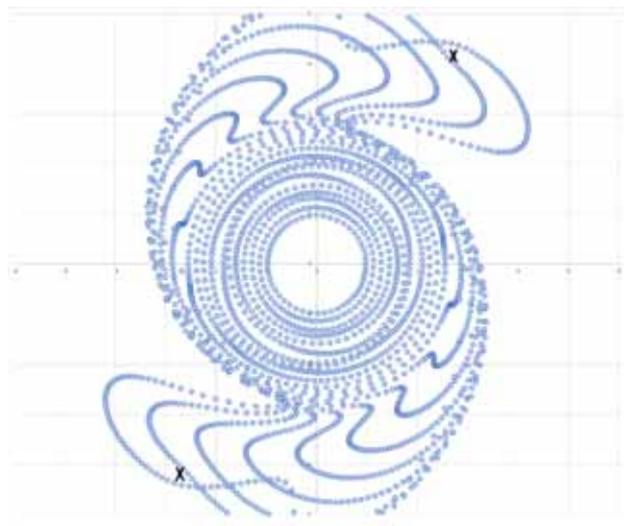


図 4b . t=12.0

4 . まとめ

銀河の成長過程においては、衝突・合体・近接相互作用が高頻度で起きてきたと考えられている。必然的にパータベーション重力場の影響を受け、円盤銀河には渦巻パターンが生じることになる。また、母銀河の重力場の形状やパータベーション重力源となる伴銀河の運動によって、さまざまな渦巻パターンが生じることが確かめられた。

参考文献

- [1]飯山青海、大阪市立科学館研究報告 2020、P77
- [2]C. Lin&F. Shu, "On the spiral structure of disk galaxies", *Astrophysical Journal*, **140**, pp646-655(1964)