

銀河の構造形成の N 体シミュレーション

野上 裕美子*

2008年2月8日

概要

銀河は楕円形、レンズ型、渦巻き型、棒渦巻き型、不規則型、中間型の6種類に大きく分類される。本研究では渦巻き銀河に着目し、星の集団ができて銀河構造を形成する過程をシミュレーションする。ここでは、非衝突 N 体シミュレーションの方法を用いて、(1) ディスク状の構造が現れる過程、(2) 渦巻きができる過程を調べる。重力相互作用する N 個の質点(星)の位置と速度の初期値を与え、リープフロッグ法で数値積分し、時間変化を追う。ダークマターを外力ポテンシャルとして取り入れることにより、渦構造の形成が促進されることを示す。数値計算の結果は Mathematica を用いて可視化し、発表用に Gnuplot を用いてアニメーションを作成した。

1 目的

銀河の構造形成の基本は、重力相互作用し、全エネルギーと全角運動量が保存される質点系(星またはガス粒子)に初期回転を与えたときに現れる力学的な振る舞いと考えると、 N 体シミュレーションを行うことが目的である。あわせて、宇宙の質量の23%を占めていて、銀河の形成に重要な役割を果たしていると言われているダークマターの効果を調べる。

さらに、数値計算、計算機シミュレーション、プログラミングの基礎的な技法を身につけることも目的としている。

2 理論

2.1 銀河 (Galaxy)

宇宙の誕生後、ある段階でハドロン(重粒子)が大量に生成され、ハドロンガスが重力により集まって星の集団ができた。こうして生まれた星の中では核融合によりさまざまな物質原子が作られて、現在のわれわれのまわりの物質が存在している。燃え尽きた星はやがて超新星爆発を起こし、またどこかで新しい星が生まれるといった歴史が星の集団の中で繰り返されるとともに、星の集団全体としては銀河構造に発展していく。このようないくつもの銀河が銀河団となって宇宙に散らばっている。

銀河はもともとは、太陽系が属している天の川銀河(銀河系とも言われる)を意味していた。夜空には恒星と星団以外に星雲(Nebula)と呼ばれるものが観測された。この星雲と

*近畿大学理工学部(2004年4月入学)理学科物理学コース理論物理研究室

呼ばれていたものの中に、天の川銀河の外に同じような銀河が無数に存在することがわかるようになり、今日ではこれを一般に銀河と呼んでいる。アンドロメダ大星雲と呼ばれてきたものが、その典型的な例であり、現在では天の川銀河と非常によく似た銀河であることがわかり、アンドロメダ銀河、または M31 銀河と呼ばれている。一方、星雲は現在では天の川銀河の中に存在するガスや塵の集団のことに使われている。

現在 1000 億個以上発見されている銀河は、その形によりいろんな分類の仕方があるが、大きく分けて、楕円形、レンズ型、渦巻き型、棒渦巻き型、不規則型、中間型の 6 種類がある。これらの様々な形があることは、銀河が発生する際のメカニズムに違いがあるのか、あるいは銀河の進化の様々な段階を表しているのかまでは、わからない。

中でも美しく目立つのは、ディスク状の渦巻き銀河である。天の川銀河もこの典型的な銀河であると考えられている。そのほかにアンドロメダ銀河が有名である。この銀河は、中心にバルジと呼ばれる核の部分があり、ここには最初にガスが集中してできた比較的古い星(赤い星)が集まっている。このバルジを 2 本の長い渦の螺旋型の筋が幾重にも取り巻いている。星は主として腕と呼ばれるこの螺旋状領域に集まっている。太陽系は中心から 3 分の 2 程度の位置の腕の中にあり、毎秒 220 キロメートル、約 2 億年で公転している。

どのようにしてこの腕ができたかについてはいろいろな説がある。自己重力のある回転粒子系の力学的な不安定モードである、もともとのガスに流体的な密度波が発生し、主としてその密度の濃い部分で星が生まれる、あるいはほかの銀河との接近または衝突による衝撃で発生した、などである。



図 1: アンドロメダ (M31) 銀河

2.2 ダークマター

しかしながら渦構造そのものは、ディスク状の星の集団があるとき、中心に近いほど回転速度が大きいことにより形成されることは間違いない。例えば惑星系でもケプラーの法則により、回転角速度は中心からの距離の $3/2$ 乗に反比例する。実際には、光のドップラー効果で観測された星の回転速度は、バルジ部分の外のディスク部分では、中心からの

距離によらずほぼ一定である。(銀河の回転曲線問題という。)したがって角速度は距離に反比例して、中心に近いほど大きくなり、星の運動は渦構造になる。

ケプラーの法則はもちろん、あとで出てくる力学的に平衡で一様回転するマクローリンディスクでも、この速度一定の法則は得られない。さらに、星の質量が球(またはディスク)状に分布しているとして、銀河の周辺部の回転速度から求められた銀河の質量は、見えている星から推定される質量より、かなり大きい。このため、宇宙には目に見えない物質「ダークマター」があり銀河の星の回転速度を決めていると仮定されてきた。回転速度一定の場合の遠心力とつりあうためには、距離に反比例する力が働いている必要がある。ダークマターの分布が球対称であり、半径 r より内側の質量が $M_D(r)$ であるとして、

$$\frac{v^2}{r} = G \frac{M_D(r)}{r^2}$$

中心からの距離 r の大きいところで v 一定であるためには

$$M_D(r) \propto r$$

でなければならない。このため、ダークマターの質量分布密度として

$$\rho(r) \propto \frac{1}{r^2 + a^2}$$

の形が用いられ、観測データの解析に使われてきた。

宇宙にはこのガスと星からなる銀河、銀河の集団以外にこのダークマターと呼ばれる物質が存在し、最近では宇宙の質量の 23% を占めていると言われている。ダークマターの正体はまだわかっておらず、ブラックホール、光を出さないニュートリノなどと言われてきたが、最近の新聞記事では「燃えることのできなかつた星」であるとも言われている。

2.3 天の川銀河

天の川銀河の姿についての現在の定説は、直径 10 万光年、厚さ 1 万光年ほどのディスク、中心にあるバルジ、さらに直径 15 万光年ほどのダークマターのハローである。太陽と同じような恒星はおおよそ数千億個あるといわれる。さらに中心には、自己重力で巨大な質量が集中したブラックホールがあるのではないかとされている。

3 方法

数値計算は「 N 体シミュレーション」と呼ばれる方法を、Fortran プログラムを作成して実行した。描画は Mathematica、アニメーション化は Gnuplot を用いた。概要は以下の通りである。以下の方法の各項目については、次の節で詳しく述べる。銀河の発生過程ではなく、星の集団ができてからの銀河の構造の発達を調べることがこの研究の目的のため、星の衝突とそれによる力学的エネルギーの消滅過程(衝突して熱になる)は考慮していない。

1. N 個の質点の初期位置を一様乱数を用いて与える。
2. 速度の初期値は回転角速度によって与える。

3. N 個の質点の質量は一定とせず、適度の幅を持った正規分布で与える。(このため、2. で速度に分布を持たせなくても、運動エネルギーは揺らぎを持つことになる。)
4. 運動方程式を N 個の質点の座標と運動量を変数とする連立一階常微分方程式として、リープフロッグ法による差分で積分する。
5. 各質点に働く重力は、ほかの $N - 1$ 個の質点の位置と質量から、各ステップごとに計算する。
6. 異常接近による計算精度の破綻 (星の位置、しがってエネルギーが不連続に飛んでしまう)を防ぐため、ポテンシャルのソフトニングを導入する。

シミュレーションは以下の I・II の場合に分けて実施した。

- I 重力相互作用する星の様な球状集団に、初期回転があった場合の回転の影響について調べる。これを、(i) 回転がまったくない場合、(ii) 球の周辺部で遠心力と自己重力がちょうどつりあう場合、(iii) これより大きな回転速度を与えた場合、について実施する。
- II すでに時間がたって星の集団がディスク状になったとして、ダークマターの効果を入れた渦形成の過程を調べる。初期分布には、ある程度時間が経過した後であることから、各点における重力と一様回転の遠心力がつりあうマクローリンディスク (質量の分布は、一様な密度の回転楕円体を押しつぶした極限の形である) を用いる。

$$F(r) = -\frac{\partial\phi}{\partial r} = -\Omega_0^2 r, \quad \Omega_0^2 = \frac{3\pi M_G}{4R_0^3}$$

これは、可能な限り力学的に平衡な状態を用いることで、初期条件による人為的な構造が現れることを避けるためである。

さらに、速度一定の法則を導くため、速度分布を決めているといわれる球対称なダークマターハローを、距離に反比例する外力ポテンシャルとして与える。この場合の中心力は

$$-F_D(r) = G \frac{M_D}{r R_0}$$

半径 r 内の質量は

$$M(r) = \frac{M_D r}{R_0}$$

である。この場合のポテンシャル ($\log r$) は中心で発散するが、ゆるやかな発散であって計算に大きな影響を与えないため、こちらにはソフトニング (後述) を取り入れていない。星の最初のディスク半径以内にあるダークマターの質量 M_D と星全体の質量 M_G の比をパラメータとして、色々な値で計算を行なった。宇宙の質量の 23% (ダークエネルギーを含めると 90% 以上) はダークマターであり、ハローの半径は銀河の半径の 1.5 倍くらいあるとされているため、この比を 5 程度とした。星の初期速度は、やはり力学的平衡状態から出発するため、マクローリンディスクによる自己重力とダークマターのポテンシャルによる重力をあわせたものと遠心力がつりあうようにとる。力学的に平衡な状態をとっているにもかかわらず、乱数で与えた星の分布は連続ではなくにばらつきがあるため、星は次第に運動を開始する。

3.1 N 体シミュレーション

惑星系天体力学から発達した方法で、星一つ一つを質点とみなし、その運動方程式を解く方法。銀河を扱う N 体シミュレーションには大きく分けて二つある。

- 衝突系
星と星との衝突により力学的エネルギーが失われて銀河全体として平衡に達していく過程、つまり長時間にわたる銀河の発生と進化を扱うのに適している。
- 非衝突系
銀河の短時間の変化、構造形成を扱うのに適しており、衝突のない質点系を扱う。

今回は、銀河の生成ではなく、星の集団が典型的な銀河の形であるディスク状になっていく様子と、ディスク状の集団に渦巻き構造が発生する様子を見ることを目的とするため、比較的プログラミングしやすい非衝突系を用いる。

非衝突系の N 体シミュレーションにも 2 通りの方法がある。

1. 直接、連立微分方程式を解く方法

連立方程式

$$\frac{dx_{i,k}}{dt} = v_{i,k}, \quad (i = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, 3)$$

$$\frac{dv_{i,k}}{dt} = G \sum_{j \neq i} \frac{m_j (x_{j,k} - x_{i,k})}{r_{ij}^3} + \text{外力}, \quad (i = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, 3)$$

を積分する。

2. ポアソン方程式を用いる方法

星の集団がほとんど連続とみなせることから、各瞬間の星の分布からある程度ならした密度分布 $\rho(\vec{r})$ を求め、ポアソン方程式

$$\nabla^2 \phi(\vec{r}) = 4\pi G \rho(\vec{r})$$

を解いてポテンシャルエネルギー $\phi(\vec{r})$ を求め、速度についてだけ微分方程式

$$\frac{dv_{i,k}}{dt} = -\frac{\partial \phi(\vec{r})}{\partial x_{i,k}}, \quad (i = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, 3)$$

を積分する。実際には、銀河が含まれる十分な大きさの立方体を適当なメッシュで分割して平均化した密度関数を用いて、フーリエ級数の方法でポアソン方程式を解く。

1 の方法は時間発展ごとに $N \times (N - 1)$ 対の重力を計算しなければならない為、 N が大きいときには計算時間が膨大になる。しかし N を十分大きくすることができて、しかも数値積分が精密にできるのであれば、こちらの方が現実に近い。なによりも初心者にとってプログラムが比較的簡単な 1 の方法を採用した。

3.2 ソフトニング近似

2の方法では、メッシュで分割された小さな立方体の中では力は同じになるため、近くにいる星は同じように運動し、全体として滑らかで流体的な動きを示す。これに対して1の方法では、たまたま接近した二つの星は、お互いの周りを連星のようにまわるなど、局所的な激しい運動を示す可能性がある。N体シミュレーションでは星を大きさのない質点としているため、星としては意味のない異常接近をした場合には、ポテンシャル $\phi(r) \sim 1/r$ の深い穴に落ち込むと、その分だけ運動エネルギーが異常に増大し、座標の増分 $v\Delta t$ が数値計算で想定している精度を大幅に越えてしまうことがある。これが起きると星の位置が不連続に飛ぶため、位置エネルギーが不連続に変化してしまい、エネルギー保存則が数値計算の精度の適用範囲外で破れてしまう。実際、プログラムを作って、粒子数を増やしていくと、位置エネルギーが不連続に変化するのが見られた。これを防止するのがソフトニングと言われるポテンシャルの修正である。

重力は長距離力であって、星がほぼ一様で連続な分布をしていると、遠くの星たちほど影響が大きいというパラドックスがある。ある星から距離 $r \sim r + dr$ の距離にある星によるポテンシャルへの寄与は

$$G \frac{\rho(r) \times 4\pi^2 dr}{r} = 4\pi G \rho(r) r dr$$

となり、近くの星の寄与は小さい。実際には質点の数が少なくて近くの密度は平均化されないため、上の様な異常接近が起きてしまう。したがって、星の局所的な運動は考えずに、銀河の大きな構造の変化だけを見たいときには、重力ポテンシャルの $r \sim 0$ 付近の特異性、 $\phi(r) \sim 1/r$ は除いても構わない。そこでポテンシャルを

$$\phi(r) \frac{Gm}{\sqrt{r^2 + \epsilon^2}}$$

と置き換える。 ϵ は星の大きさに対応すると考えてよいが、非衝突モデルではどれくらいにしたらいかという根拠は何もなく、経験的にエネルギー保存則を大きく破らない程度に十分小さい値が採用される。2の方法では、ならされた密度を用いることにより、結果的にはこのような修正が行なわれていると考えるとよい。

3.3 常微分方程式の差分化

運動方程式を計算機で積分するには、差分化する必要がある。微分方程式が

$$\frac{dx}{dt} = f(x)$$

のとき、最も簡単な方法は、 $h = \Delta t$ を時間の差分幅として

$$x \longrightarrow x + hf(x)$$

を単純に繰り返す「オイラー法」である。もう少し精度を上げるには、これで得られた新しい値

$$x_1 = x + hf(x)$$

での勾配 $f(x_1)$ と、もとの勾配 $f(x)$ との平均をとって

$$x \rightarrow x + \frac{h}{2}(f(x) + f(x_1))$$

とする(「ルンゲ・クッタ法」)。これを2回繰り返すのが4次のルンゲ・クッタ法と呼ばれ、よく用いられている。この方法では、1回1回の差分における誤差は h^6 程度になり、非常に優秀であるが、欠点は長時間使用した場合に、この誤差が一方向的に積もっていくことである。したがって、運動方程式の全エネルギーのように保存量がある場合には、不適切である。これに対して、微分方程式で保存量がある場合には、差分化した場合にも保存性を保証するような工夫をしたシンプレクティック法と呼ばれる方法がある。リープフロッグ法は2次のシンプレクティック法である。今回の計算の設定の範囲では、4次でも見かけ上の差は出なかったので、2次を用いた。

運動方程式は、 N 個の質点の座標と運動量(または速度)の $6N$ 次元位相空間の点(の集合)から点(の集合)への時間を追った写像である。差分化した場合は、時間パラメータが離散的な変換になる。この変換で保存則が保たれるようにする。実際に保存される量はエネルギー(ハミルトニアン)そのものではなく、差分幅 h に依存する付加項があって、 h^2 の大きさで時間的に振動し、エネルギーはこの振動の幅の範囲内で平均的に保存される。したがって、 h を十分小さくしておけば、長時間たってもエネルギーの保存性は厳密に維持される。さらにリープフロッグ法では、運動方程式で全角運動量が保存される場合には、差分でも全角運動量そのものが差分幅 h によらず不変に保たれるという利点がある。これは数値計算でも確認された。

3.4 その他、プログラミングで考慮したこと

1. 数値積分の精度を保障するため、倍精度(8バイト)実数を用いて計算した。
2. まとまった作業部分はできるだけサブルーチン化し、プログラム作成を効率化した。また、リープフロッグ法や乱数発生も、数値計算パッケージのものを利用せず、原理を身につけるため自分でサブルーチンを作成した。一様乱数の発生は、必要とする乱数列の数が1万個程度と少ないため、乗算合同法と呼ばれる、もっとも簡単でよく使われている方法を採用した。どんな乱数発生法でも、癖があることは避けられず、奇妙な振舞いが出た場合には慎重に検討する必要があるが、今回はそれと思われる現象は見られなかった。
3. 並列計算の概念を身につけるため、ベクトル化できるところは可能な限りベクトル化できる形でプログラムした。具体的には、例えば N 個の質点の $3N$ 個の座標と $3N$ 個の速度の差分変化は、それぞれがすべて同じ形で書いて、同時に計算することが可能であるから、それぞれを一つの配列にし、Fortran 特有の配列式の形でプログラムを書いた。

4 計算

4.1 運動方程式の無次元化 (スケーリング)

MKS 単位系で万有引力定数 G は $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$ ととても小さいので、これが 1 となるように運動方程式の無次元化を行なう。こうしないと、変化が速すぎたり、逆に遅すぎたりして、意味のある結果が得られない。そこで、距離を測る単位を L 、時間の単位を T 、質量の単位を M として、新しい単位系での距離、時間、質量をそれぞれ

$$\frac{r}{L} = r', \quad \frac{t}{T} = t', \quad \frac{m}{M} = m'$$

とする。これらを万有引力の法則による運動方程式

$$\frac{d^2 r_i}{dt^2} = \sum_j G \frac{m_j}{r_{ij}^2}$$

に代入すると以下のようになる (簡単のためベクトル量であることを無視している)。

$$\frac{d^2 r'_i}{dt'^2} = \left[G \frac{MT^2}{L^3} \right] \sum_j \frac{m'_j}{r'^2_{ij}}$$

この [] の係数が 1 となるようにする。よって、距離の単位 L 、質量の単位 M を決めれば時間の単位は

$$T = \sqrt{\frac{L^3}{GM}}$$

にとったことになる。

距離の単位 L

この計算では星の集団の初期半径を $R_0 = 250$ とした。銀河系 (天の川銀河) の直径は 10 万光年とされているので、銀河系と同じ半径の系を想定すると

$$R_0 \times L = 50000 \text{ ly}$$

1 光年は

$$\begin{aligned} 1 \text{ ly} &= (3.0 \times 10^8) \times (365 \times 24 \times 3600) \\ &\simeq 9.5 \times 10^{15} \text{ m} \end{aligned}$$

よって

$$\begin{aligned} L &= \frac{50000 \times 9.5 \times 10^{15}}{R_0} \\ &= \frac{4.7 \times 10^{20}}{R_0} \\ &\simeq 1.9 \times 10^{18} \text{ m} \quad \simeq 200 \text{ ly} \end{aligned}$$

とおくことに等しい。

質量の単位 M

銀河系の質量 M_G は、回転速度から力学的に決められ、太陽質量 (2×10^{30} kg) の約 2000 億倍といわれている。このうち星の質量が 10 % を占めていると仮定するならば、星の質量は

$$M_G \simeq 4 \times 10^{40} \text{ kg}$$

となる。今回の計算ではこの単位系で質量の平均値 1 の星を $N = 10000$ 個用意したので

$$NM = M_G$$

よって、質量の単位は

$$M \simeq \frac{4 \times 10^{40}}{10000} = 4 \times 10^{36} \text{ kg}$$

となる。これは星 1 個の質量としては大きすぎる (恒星の質量は太陽の 100 倍程度が限度とされている。) が、シミュレーションでは N をそれほど大きくとれないので何かを犠牲にせざるを得ない。しかしながら、ここでとった N 個の質点は、1 個 1 個が星を表しているのではなく、星の集団を連続分布とみなして、適当な粗さで星の集合を表す点であるとも考えることもできる。したがって銀河全体の星の質量を N で割った量が質量の単位 M であると考えるのが妥当である。

時間の単位 T

重力定数は $G = 6.7 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ だから

$$T = \sqrt{\frac{(1.9 \times 10^{18})^3}{6.7 \times 10^{-11} \times 4 \times 10^{36}}} \sim 1.6 \times 10^{14} \text{ s} \sim 500 \text{ 万年}$$

程度となり、銀河の構造形成を見る時間として、現実的である。

今の計算モデルでは、星と星の間の重力は瞬間的に伝わるとしている。しかし、重力も、電磁気力と同じで伝わるのに時間がかかる。重力も光速で伝わるとしたら、直径が 10 万光年の銀河の端から端まで伝わるには、10 万年もかかることになる。これは、この単位系での 1 単位時間 (数百万年) に比べたら微妙にはなるが、銀河の大域構造が現れる 10~100 単位時間と比べると、その正当性には疑問が残るが、まだ十分短くて、考慮する必要はないだろう。

5 結果

シミュレーション I

(i) 回転のない場合

最初のうちはあちこちで局所的な凝集が起きるが、自己重力によって速やかに中心に集まってしまい、球状星団のような形に落ち着く。ただし、位置エネルギーの減少により大きな運動エネルギーを得た少数の星は、この集団からどんどん離れて飛び去ってしまう。球状集団の内部では各星は激しいランダムな相対運動をしている。これは、ガスが最初に集ってできたバルジ部分に似た振る舞いになっている。

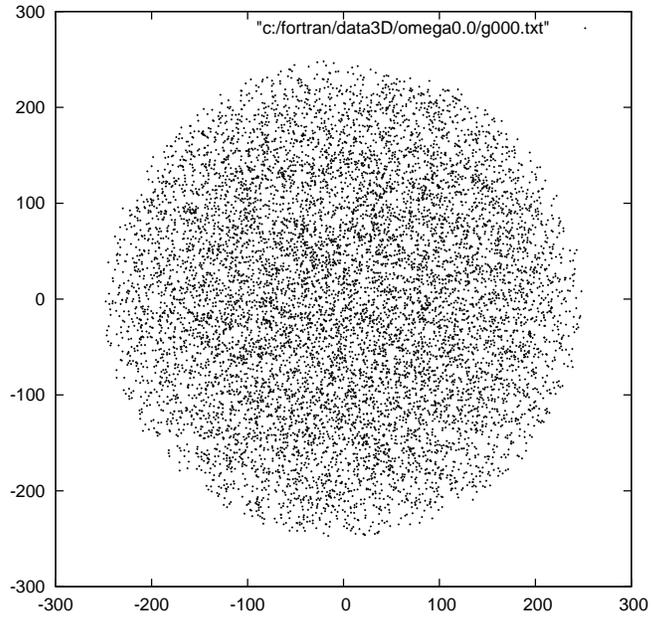


図 2: 初期状態

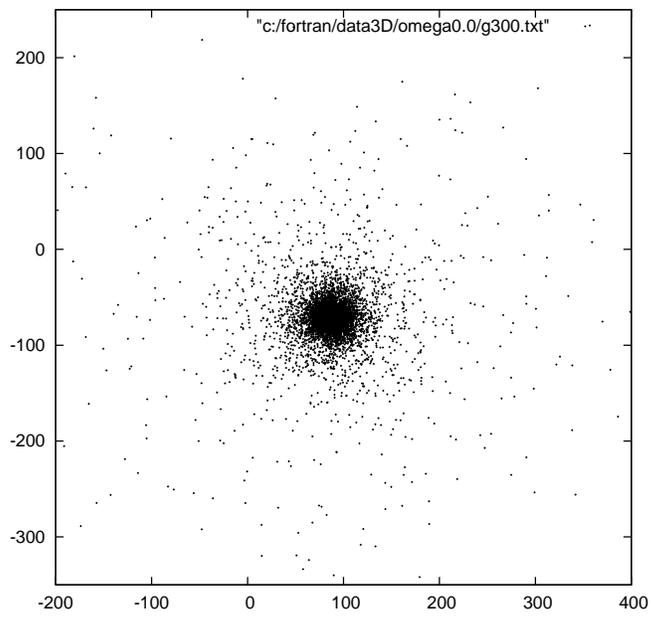


図 3: 回転のない場合 ($T = 300$)

(ii) ちょうど遠心力がつりあう回転を考えた場合

局所的な構造を形成しながらディスク状に収縮したあと、ある程度厚さが回復すると同時に、回転軸に垂直な方向に広がっていく。この段階で、局所的な構造がまとまって渦状の数本(2~3本)の筋にまとまるのが見られた。これが腕の原形に相当するのかもしれないが、今回のシミュレーションではこの構造も次第につぶれ、飛び去った星を除く部分は球状星団のようになってしまった。腕らしき部分を構成する星はどんどん入れ替わっていくのが見られることから、星ではなくて密度の波と考えられないこともないが、構造が長時間持続しないため、判定はむずかしい。

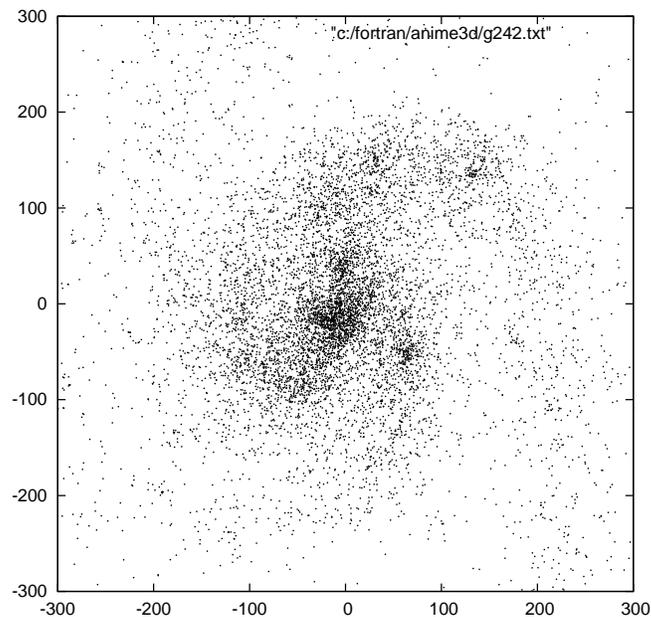


図 4: つりあう場合 [上から見た図 ($T = 242$)]



図 5: M51 銀河 (りょうけん座)

(iii) 大きな回転速度を与えた場合

回転速度をつりあいの数倍 (5 倍程度) にした場合、激しくディスク化が起き、一番著しいときにはアスペクト比 (縦横比) が 1 : 100 くらいにまで達した。このあと再び厚さの方向にも広がって、1 : 10 程度のディスク状になって、この状態がずっと続いた。

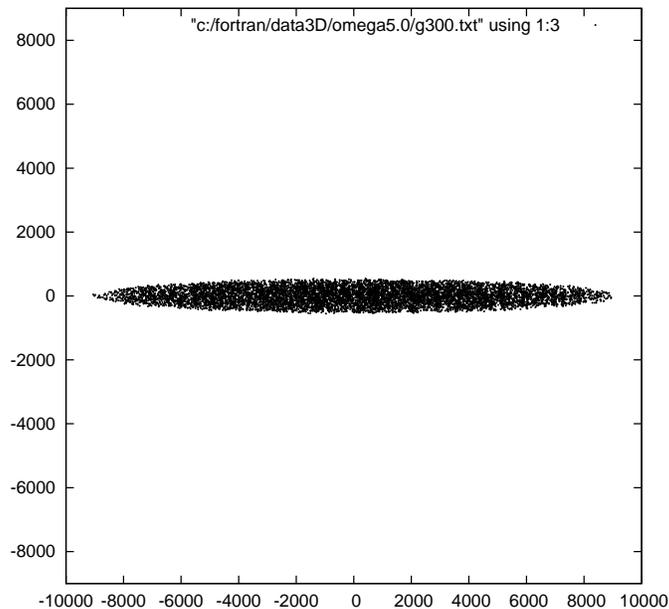


図 6: 大きな回転速度を与えた場合 [横から見た図 ($T = 300$)]

いずれにしても、ディスク化にとって、集団の初期回転が重要な役割を果たしていることがわかった。

シミュレーション II

まず、マクローリン・ディスクが力学的平衡であることは式から理解できなかったため、数値実験で確かめた。マクローリン・ディスクの密度になるように 10000 個の質点の位置と質量を 100 通りランダムに与え、角速度 Ω_0 で回転させたときの、位置エネルギーと運動エネルギー、及びその比は以下のものであった。期待される値 (2.0) からのズレは、各配置についてはおよそ $\pm 2\%$ で、100 通り繰り返したときの平均は約 0.1% で、逆 2 乗力の場合のビリアル定理が成り立っていることが確かめられた。

DATA	KE	PE	PE/KE
1	200915.083	-395414.911	-1.9681
2	200985.038	-403460.886	-2.0074
3	196820.611	-393673.058	-2.0002
4	198587.072	-399502.068	-2.0117
5	198921.672	-396429.943	-1.9929
6	196252.216	-391610.381	-1.9954
7	198545.525	-402926.973	-2.0294
8	196870.916	-400864.302	-2.0362
9	198375.586	-398545.617	-2.0090
10	197794.188	-393313.613	-1.9885
.....			
98	199625.224	-397564.826	-1.9916
99	198159.385	-400918.590	-2.0232
100	200583.239	-397037.098	-1.9794
			Heikin = -2.0008

表 1 : ビリアル定理の確認 (PE=位置エネルギー、KE=運動エネルギー)

次に、シミュレーション II を実行すると、ダークマターの効果を入れることによって、図 7 のように渦巻き化がより顕著に現れた。

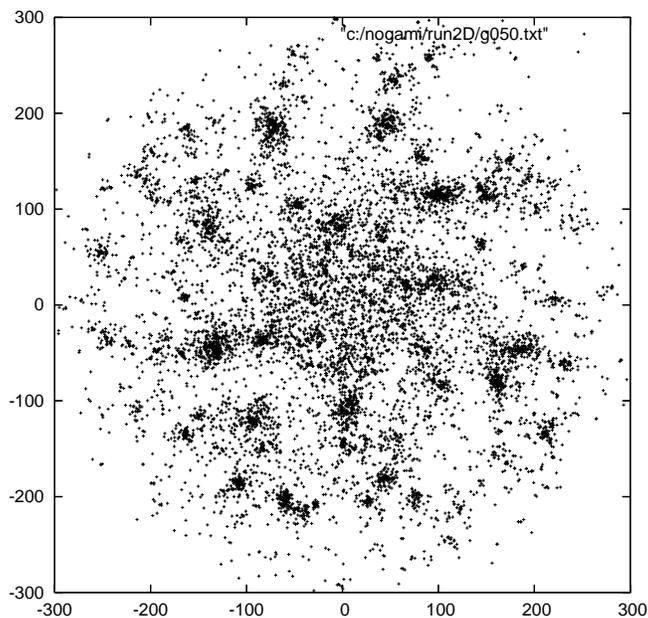


図 7: 星の分布 ($T = 50$)

回転速度 (速度の回転方向の成分) の動径方向の分布 (図 8) を見てみると、局所的な運動によってばらつきはあるものの、平均値は最終的にはほぼ半径によらず一定になっていて、ダークマターの効果が、はっきり現れている。ちなみに、速度の数値 15 はおよそ 200 km/s に相当し、銀河の中での太陽の公転速度とほぼ一致している。この段階では、まだ中心に質量が集まっていないので、図 9 の銀河系の回転速度曲線に現れている r が小さいときの増加 (ケプラーの法則に相当) は見られなかった。

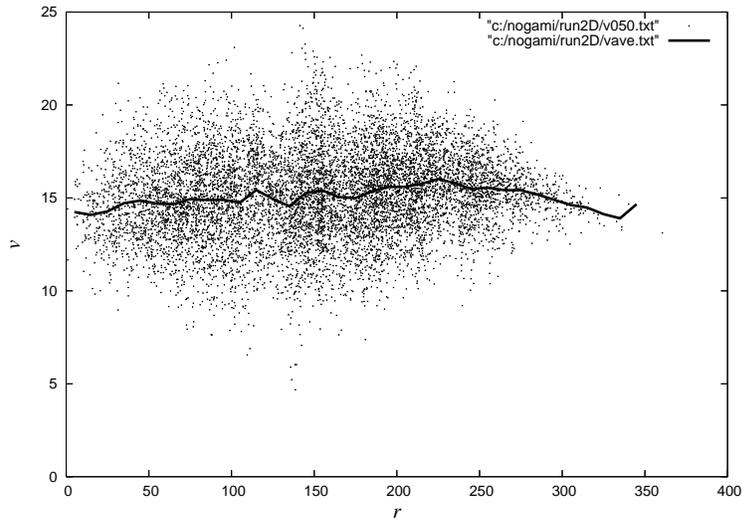


図 8: 回転速度の動径方向の分布 ($T = 50$)

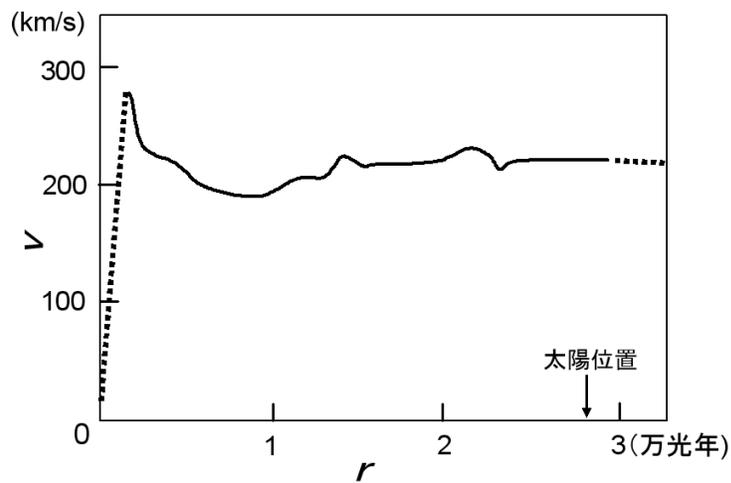


図 9: 銀河系の回転速度曲線 (「理科年表」から作成)

回転速度が一定であるため、回転の角速度が銀河の中心からの距離に反比例して速くなり、渦巻き化が促進されたのである。このように、ダークマターは、星が銀河から飛び散ってしまわないように閉じ込める効果と同時に、銀河内での星の回転速度一定の法則を保障しており、渦巻き化にとって重要な役割を果たしていると思われる。

さらに、 $N = 20000$ でシミュレーションを行うと $N = 10000$ の場合より渦が明瞭に現れる。

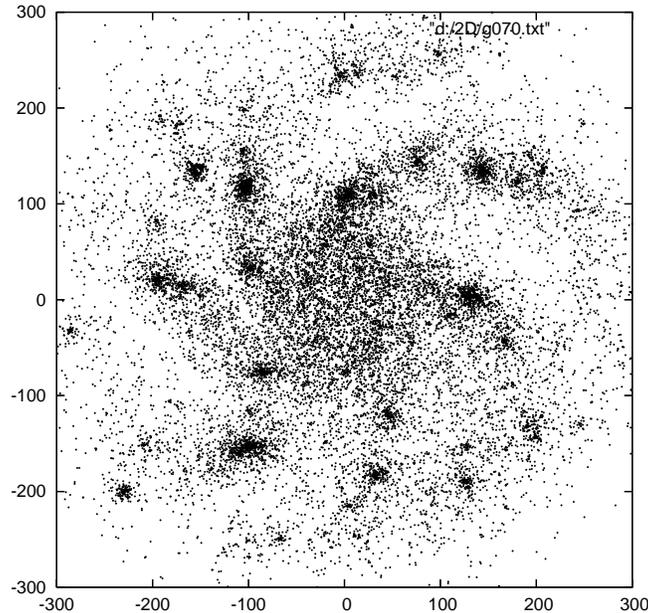


図 10: 星の分布 ($T = 70$)

なお、粒子数が N 、初期半径が R_0 、質量の平均が \bar{m} のとき、時間の単位は

$$T = \sqrt{\frac{L^3}{GM}} = \sqrt{\frac{R_G^3}{GM_G}} \times \sqrt{\frac{N\bar{m}}{R_0^3}} \simeq 2 \text{ 億年} \times \sqrt{\frac{N\bar{m}}{R_0^3}}$$

となり、 N が増えると変化が速くなる。

6 まとめ

本研究は衝突のない質点系を用い、銀河の構造形成を N 体シミュレーションで解析するというものである。

今回の研究によって渦巻き銀河の形成に、ダークマターが重要な役割を果たしているということを示すことができた。

シミュレーション I・II ともに、十分に長い時間がたつと、構造が消え、最後は単純な球状分布になってしまう。実際の銀河も、渦を巻き、きれいな腕構造が見えているのは、進化の途中の一時的な構造かもしれない。実際、計算の途中で、失敗作も含めて現れたパターンに似たものは、銀河の写真の中によく見かけられた。

謝辞

本研究をおこなうにあたり、お忙しい中丁寧に御指導下さった中原幹夫教授に深く感謝いたします。プログラミングやアニメーションについて御指導頂いた富田博之先生、また、貴重な御意見、御協力下さった諸先生方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 谷口義明「シリーズ現代の天文学 銀河 I」「同 II」(日本評論社)
- [2] バーバラ・ライデン/牧野伸義訳「宇宙論入門」(ピアソン・エデュケーション)
- [3] 中原幹夫「空間を測る：物理学，幾何学，そして宇宙」『数理科学』NO.488(2004),p61
- [4] 富田博之「Fortran90 プログラミング」(培風館)
- [5] 高橋大輔「理工系の基礎数学 8 数値計算法」(岩波書店)
- [6] 伏見正則「乱数」(東京大学出版会)
- [7] 牧野淳一郎「web 講義ノート 数値計算法の基礎」
http://www.cfca.nao.ac.jp/muv/makino_07.pdf
- [8] 国立天文台「理科年表 平成 19 年」(丸善株式会社)
- [9] 二枚の銀河の写真は国立天文台のホームページから引用した。