

恒星系円盤のヴラソフ方程式によるシミュレーション

西田 実継*・渡辺 好夫*

1. はじめに

銀河は、一種独特の美しさを持つその形態により、宇宙で大変目立つ存在である。形態は、渦巻型、棒渦巻型、楕円型、不規則型に大きくわけられ、更に各々の構成要素には星ありガスありと様々なものを含み、銀河はいろんな個性を持っている。それ故、一元論的に銀河をとらえるのは難しいが、その研究は天文学に重要な問題を提示し続けている。中でも形態に関する研究、とりわけ渦巻構造の研究は古くから取り上げられ、現在でも銀河の構成要素との関連、特に星の形成の問題と関連して研究されている重要な問題の一つである。

さて、渦巻銀河のいろんな個性を取り除くと、おおよそそのところ半径約 10 Kpc の薄い円盤状に約 10^{11} 個の星が集まった恒星系円盤と、中心部のバルジと言われる球状の星の系とで銀河の骨格が作られている（最近、見えない物質が更に円盤を取り囲んでおり全体として銀河の質量が数倍大きいとする、大質量ハローの存在が提唱されているが）。

渦巻構造は銀河の骨格である恒星系円盤の示す構造であるという考えのもとに、リンとシューは 1964 年に恒星系の渦状密度波理論を展開した。それまでにも、ガスと磁場で渦巻を作るとかいろんな説があるが、ここではこの恒星系力学の立場で銀河円盤の問題を調べよう。

この理論には銀河の微分回転（中心ほど早く回る）による渦の巻き込みの問題がない。また、円盤内のガスの運動は渦状腕の所で衝撃波を作るから、密度波は星の形成の引きがねになりうる。更に、ガスの視線速度の観測や、ダスト層と若い星による電離水素領域が渦状腕にそって順に並ぶという細かい構造まで説明できる。このため、渦状密度波理論はいち早く注目され、以後円盤状恒星系の研究が精力的に行なわれることになる。

2. 無衝突恒星系の取り扱い

自分自身の作る重力（自己重力）で平衡を保っている N 個の粒子の系では、粒子同士の万有引力による 2 体衝突により系が変化する時間尺度（緩和時間）がおおよそ $N/\log N$ に比例して長くなる。星の数が 10^{11} 個もある恒星系の場合、緩和時間は宇宙年齢以上になり、無衝突恒星系とみなせる。恒星は自身の粒粒さの効果のない滑

らかな平均自己重力場の中を運動し（2つの星が異常に近づいて急激に運動を変えることがなく）、全体として平衡状態を保っている。逆にガスや流体の系では構成粒子の 2 体衝突は頻繁におこる。そのため局所的に定義できる温度、密度、圧力などの巨視的な量の関係を与える流体の方程式で系が記述できる。無衝突恒星系の場合、このような巨視的な量では記述できず、より微視的な状態を表わす情報が必要となる。すなわち、ある時刻に位置が配位空間のある区間において速度が速度空間のある区間にある粒子数はいくらか、という統計的な情報を与える分布関数がそれである。恒星系の振舞を調べるにはこの分布関数が時間的にどう変化するかを調べればよい。この分布関数の従う方程式はヴラソフ方程式（無衝突ボルツマン方程式）という名で知られている。その意味するところは、分布関数の値は粒子の位相空間内の軌道にそって一定であるという単純明快なものである。従って、恒星系力学で、恒星系の構造あるいは安定性を調べるとか、平衡状態のモデルを作るとかするには、ヴラソフ方程式と滑らかな自己重力場を求めるポアソン方程式とを自己無撞着に連立して解くことになる。もちろん、あらゆる場合を一般的に扱うことは不可能で、現実には、何らかの単純化をして解くことになる。渦巻型銀河の場合、厚さのない円盤で考えるのが多く、以下述べるように、いろんな工夫がなされて解かれている。

3. 恒星系円盤の渦巻構造と安定性

ここでは、この一組の方程式と関連して、恒星系円盤の渦巻構造と安定性の研究がどのように行なわれ、どんな問題を抱えているかを大雑把にみてみよう。

先に述べたリンとシューは、準定常渦巻仮説（QSSS 仮説）のもとに、微小振幅の波だけを考える線型理論の範囲でこの方程式の組を解析的に解いた。この仮説では渦巻構造は、安定な、厚さを無視した恒星系円盤に立つ、成長も減衰もしない中立安定な、渦巻状にぐるぐる巻きついた、恒星系の疎密波であると考えられる。ぐるぐる巻きついているという仮定により、渦の間隔くらいの長さの現象を考える限り、円盤は空間的に一様と見なせ全体の構造を考慮する必要がない。つまり局所的取り扱いができる（局所線型理論）。同じ 1964 年にトゥームレは、局所線型理論で銀河円盤が軸対称の摂動に対して安定なためには、円盤の半径方向の速度分散がある値（最小速度分散）以上なければならないことを示した。これら局所

* 京大理 Mitsugu Nishida and Yoshio Watanabe:
Vlasov Simulations of Stellar Disks

線型理論による密度波理論の長所は既に述べたが、一方では、何が渦の巻き出し方や渦模様回転速度を決めるのか、あるいは波のエネルギーが外へ運ばれるので波の維持・励起機構が必要であること、遠距離力という重力の性質による局所的取り扱いの妥当性などが問題点としてあげられる。

この問題の解決には、まず局所的取り扱いという制限だけをはずすことが考えられる。この方向に進むと、渦巻構造は密度波であるとする立場の他に、銀河円盤の大局的な不安定性によって引き起こされる不安定模様の現われであるという立場がでてくる。この場合、線型理論の範囲でも方程式を解くのは非常に難しい。また分布関数の平衡モデルを作るのもそれだけで一仕事となるほど面倒なものとなる。この仕事はカルナイと彼の弟子達により続けられている。

一方、1960年代の終わり頃から大型計算機の発達によって N 体数値実験が精力的に行なわれた。これは、 N 個の粒子の自己重力場内での運動方程式を数値的に解いて、一個一個の星の運動を追いかけるという最も微視的な状態まで求める方法である。もちろん局所線型という制限はなく、基本的に非線型大局的扱いに向いている方法である。 N 体数値実験の話は松田卓也、ソレンアタセル・ソレンセン両氏の精しい解説があるので参照されたい(天文月報 67 巻, 173 ページ, 1974 年)。

これらの結果、大局的扱いでは、局所密度波理論のような巻き込んだ模様はできず、銀河回転の時間程度で円盤の不安定性が成長することがわかった。 N 体数値実験では、持続する渦巻模様すら作れず、ほとんどの円盤が棒状構造を示すだけである。更に重大なのは、リンとシューらの大前提である安定な恒星系円盤を作るのがそもそも非常に難しくなってしまったことである。つまり、トゥームレの最小速度分散を持ち局所線型理論でかろうじて安定(臨界安定)な円盤は、非軸対称摂動に対してせいぜいおだやかに不安定だろうくらいに予想されていたのが、数銀河回転程の時間で棒状に変形し、速度分散も非常に大きくなるのが一般的に示されたのである。そのため、いかに安定な円盤を作るか、また安定化させるかが恒星系力学の大問題となる。

1973年にオストライカーとピープルスは、銀河のハロー成分による安定化を提唱した。これは、宇宙でのいろんな“知られざる物質”問題と関連して銀河の大質量ハローの存在の根拠ともなっている。また、カルナイは銀河中心部の、銀河回転とは逆向きに運動している逆行星による安定化を提唱した。

しかしながら、ポワソン方程式は、非線型の範囲で以上の問題に対して解かれていない。線型の取り扱いと比べて非線型効果はどうきくのか、波ほどのくらの振幅

まで成長するのか、 N 体数値実験で使われている 10^5 個の粒子で十分正確に無衝突恒星系がシミュレートされて

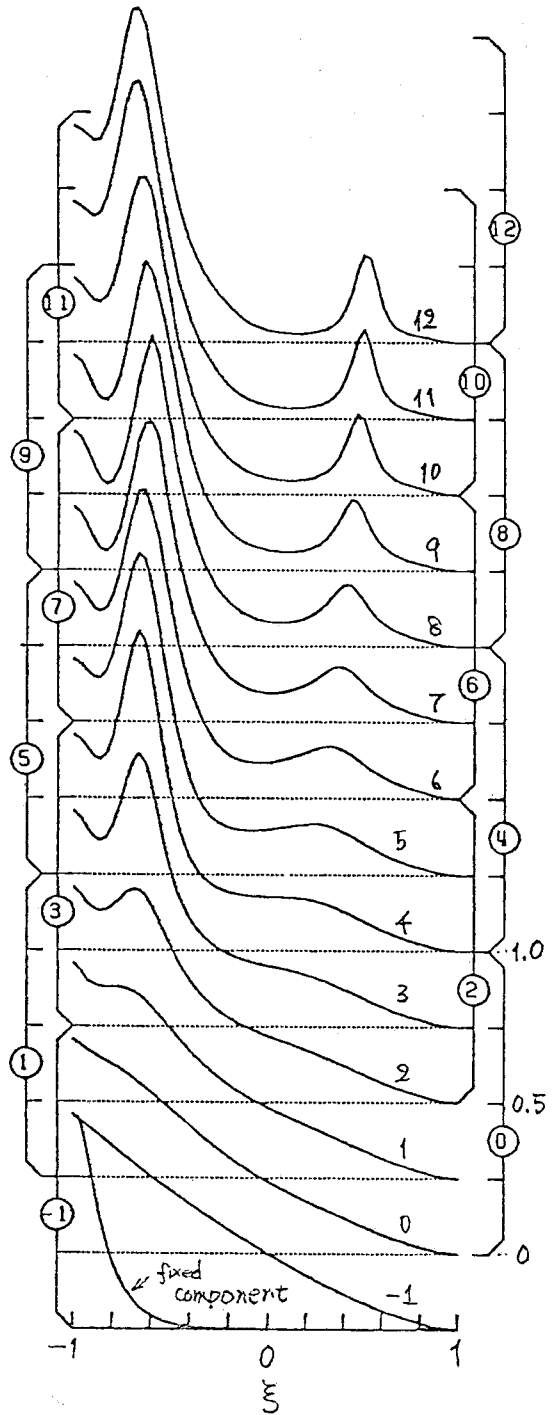


図1 宮本モデル(モデルパラメータ=10)に振幅5%、2山の摂動を与えた後の密度分布の時間的变化、横軸は ξ 、図の番号は時刻、但 -1 は摂動を与える前のモデルの密度分布。

いると考えてよいのか、ヴラソフ方程式による場合でも不安定性がかなり成長するのか、というようなことは大事な問題である。筆者らのグループでは、数値的にヴラソフ方程式を解くことを試みている。その方法は、プラズマ物理で開発されたスプリットスキームという方法で、位相空間内の粒子軌道に近似的にそって分布関数を移動させるというこれまた単純明快な方法である。自己重力場を求めるのは一般に厄介だが、青木・家両氏による表面密度と重力ポテンシャルの直交関数の対を使うと簡単に正確に求まる。以下、ヴラソフ方程式によるシミュレーションで、軸対称と非軸対称摂動に対する厚さのない恒星系円盤の振舞を調べ、このような恒星系力学の問題に対してどんなことが言えるかを考えてみよう。

4. 軸対称恒星系の場合

この場合、配位空間の座標は半径 ω だけであるが、速度空間の座標は半径方向及び回転方向の速度 (u_ω, u_θ) があるため、ヴラソフ方程式は3次元となる。しかし、このような系では単位質量あたりの角運動量 $j (= \omega u_\theta)$ が保存量であるため、位相空間内で j = 一定の面内の粒子は常にこの面内にある。従って、位相流体の動きを2次元的に捉えることができ、非軸対称系に比べ物理的描像を描きやすい。

図1は、宮本氏が1971年に提出したモデルに、2山の振幅5%程度の正弦的な摂動を与えた後の表面密度の時間的変化を追ったものである。横軸は半径 ω のかわりに、 $\xi = [(\omega/a)^2 - 1] / [(\omega/a)^2 + 1]$ という変数を使っている。 a は系の特徴的半径である。 $\xi = -1$ が系の中心に、 $\xi = 0$ が $\omega = a$ に、 $\xi = 1$ が無限遠点に各々対応している。時間の単位は、すべての質量が中心に集中した時、 $\omega = a$ での回転周期は 2π となるようにとっている。このモデルでは、トゥームレの局所線型理論によると、 $\xi \leq 0.5$ ($\omega \leq 1.7a$) の領域が不安定である。ヴラソフ方程式による数値実験でも摂動の山に対応して環が形成されて行く。しかし、この環の成長につれ、環の部分の速度分散は大きくなり、やがて成長を止めてしまう(非線型効果)。その後はわずかに表面密度分布が振動するだけである。

この様子を位相空間で見ていると、分布関数がどのように変化して環を作っていくかがよくわかる。図2は位相空間の角運動量一定の断面を時間的に並べたものである。横軸は ξ 、縦軸は半径方向の速度である。上述のように角運動量が保存量であるため、この角運動量を持つ粒子の軌道はこの面上にある。様々な角運動量の断面の時間変化を見て頂きたいのだが、紙面の都合からそれはできない。ここに載せたのは $t=6, 8, 10$ の、無次元化した角運動量 $j=0.5$ における断面であり、曲線は分布

関数の等高線である。これより小さい角運動量を持つ粒子群は、初めほとんどすべて内側の摂動の山へ向って集まる。この時が内側の環の成長期にあたる。そして環近くの位置に粒子が達すると、粒子の角運動量に対応した有効ポテンシャルの井戸に捕えられる。このあたりで環の成長は止まり、しかもこれらの粒子群の速度分散はかなり増加している。 $j \geq 0.5$ であるような粒子群は、外側の摂動の山に向って $j \leq 0.5$ の粒子群と似た振舞を見せる。但し、角運動量の大きな粒子は、エピサイクリック周期(半径方向の粒子の振動周期、この場合、系の回転周期と同程度)が長いので、なかなか粒子が集まら

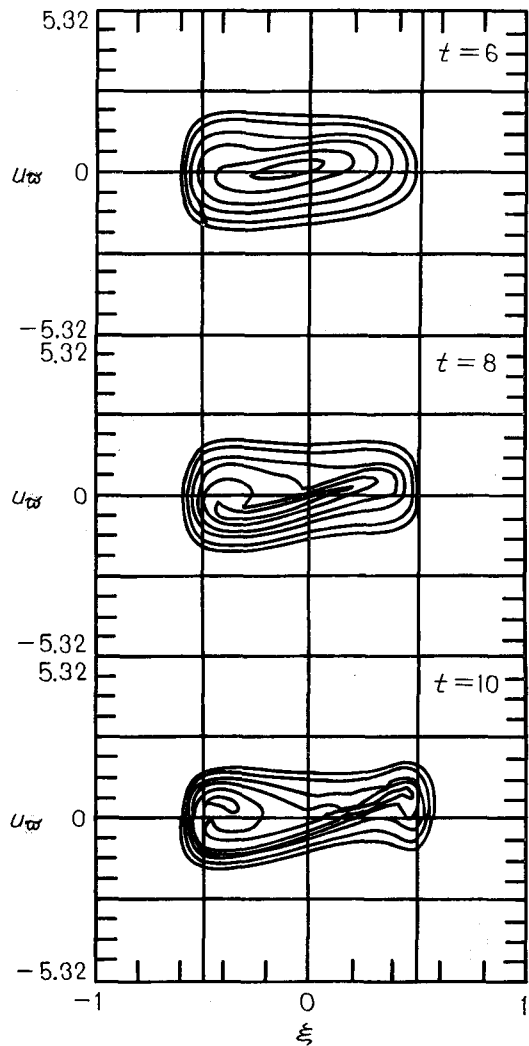
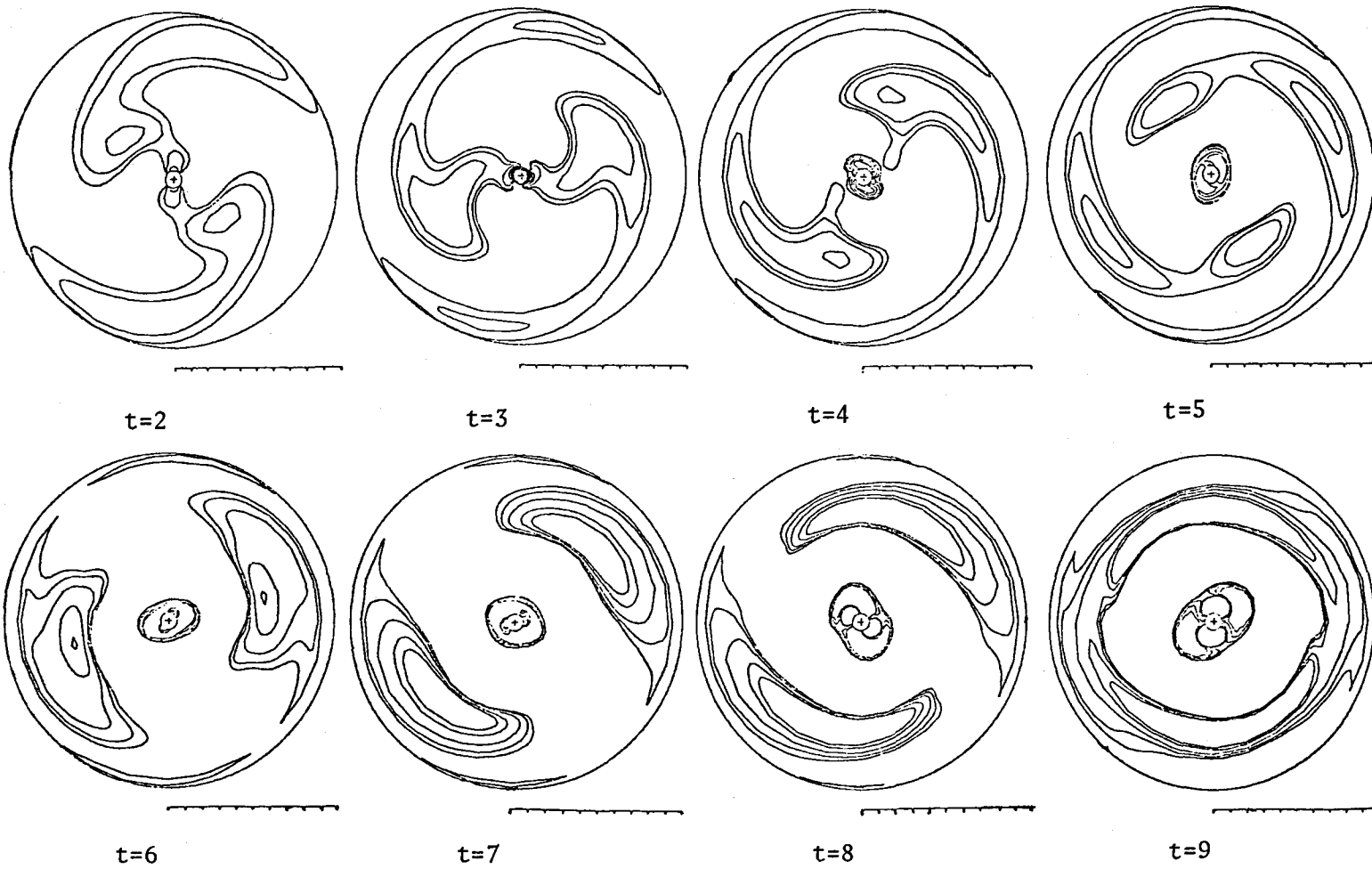


図2 図1のモデルの位相空間の $j=0.5$ における断面の分布の等高線図、横軸は ξ 、縦軸は半径方向の速度。6本の等高線の分布関数の値は中から順に、0.015, 0.01, 0.005, 0.0025, 0.001, 0.0005 である。

MIYAMOTO MODEL $m=10$ $c=0.878$ 

MIYAMOTO MODEL $m=5$ $c=0.779$

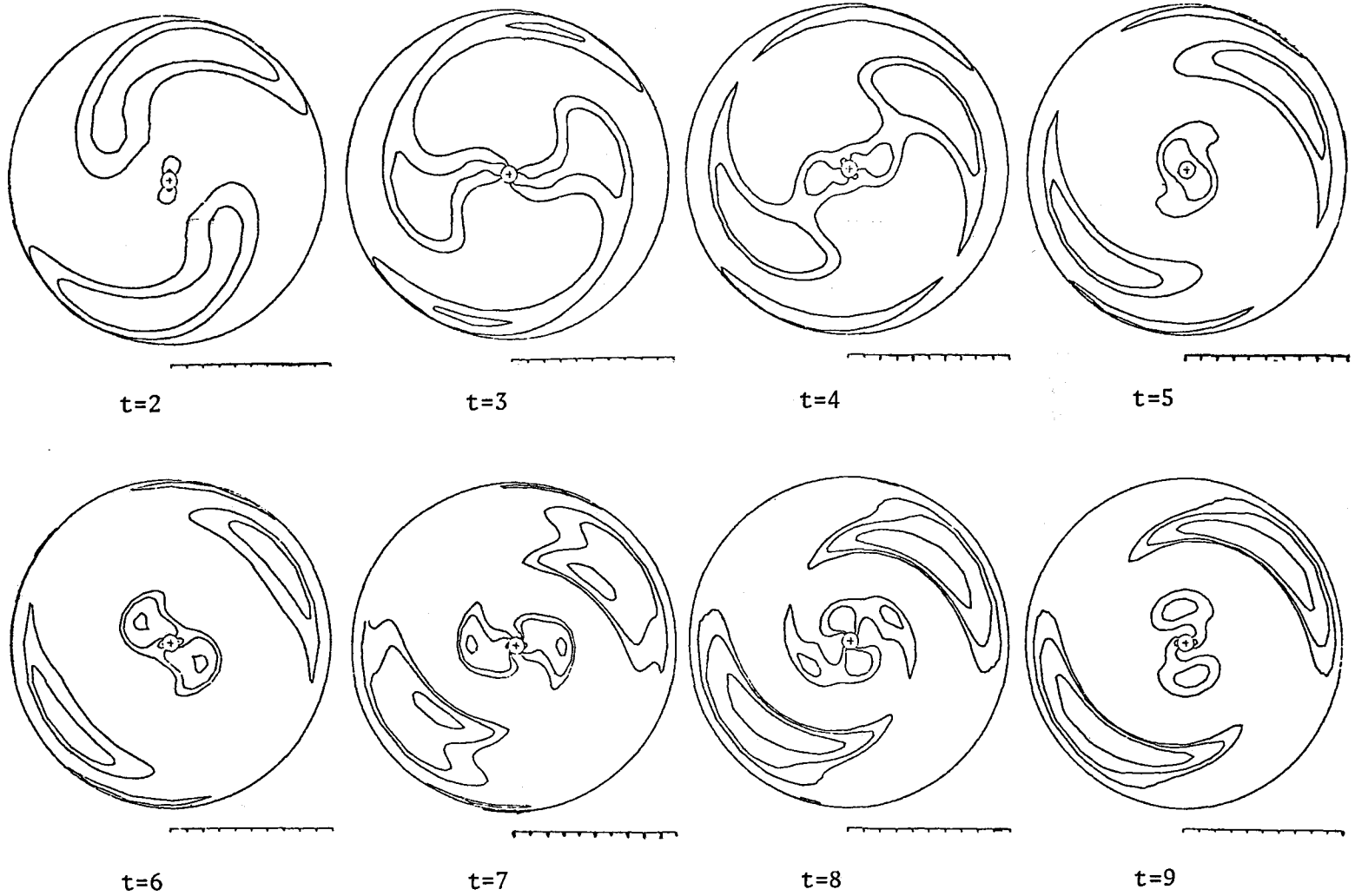


図3 宮本モデルに30%の棒状の摂動を与えたときの表面密度の変化. 等高線は2%, 5%, 10%, 20%, 30%の5本で, 平衡状態より表面密度が高い所だけ示してある.

ず外側の環は内側に比べゆっくり成長する。図1を見ると、内側の環は $t \sim 4$ で、外側の環は $t \sim 11$ で成長が止まっていることがわかる。図2の場合、 $j=0.5$ 近くの角運動量を持つ粒子は両方の摂動の山からほぼ同程度引かれる。そのため、粒子の約半分は内側の山へ、残りの半分は外側の山へ向けて動き出す。図2の $t=6$ の面にその様子が見られる。 $\xi=0$ ($\omega=a$) あたりの粒子は少なくなり等高線は細くなって行く。内側の山へ動き出した粒子は $t \sim 7$ 以降は、山のある点の回りに巻きついて行く。一方、外側へ向った粒子も、 $t \sim 10$ あたりからやはりある点の回りに巻きつき出す。 $t \sim 12$ では完全に巻きついて、環に対応した2つの分布に分かれてしまっている。

同じ宮本氏のモデルで、モデルのパラメータを変えらるといたる所局所的に安定なモデルが得られる。この場合は上述のような環の形成は認められない。摂動の振幅が大きい時は表面密度分布は振動する。振幅が小さいと表面密度分布はほとんど時間的に一定である。

カルナイが1976年に提出したモデルをも調べたが宮本モデルとほぼ同じ結果を与える。これらの実験から、軸対称安定性に関しては、トゥームレの局所線型理論による安定性の判別条件が、大局的な安定性についても定性的にあてはまることがわかった。この結論は、解析的に大局的安定性を調べたザングや、ミラーの N 体実験の結論とも一致している(但し、調べたモデルは異なる)。

5. 非軸対称恒星系の場合

軸対称の場合と同じく、宮本モデルに棒状構造に対応する摂動を与えて、分布関数がどう変化するかを調べてみる。特に興味があるのは、局所線型理論で臨界安定なモデルの場合であろう。図3に宮本モデルで臨界安定と考えてよい場合(図で $m=5$ と印してある円盤)と不安定な円盤 ($m=10$) の場合の表面密度の変化を示す。図では、平衡状態と比べて何%密度が高くなったかを等高線で示してある。時間の単位などは軸対称の場合と同じである。半径はさだから、魚眼レンズで銀河を真上か

ら写したようなものである。なお、非軸対称の場合、銀河の回転も重要な因子になるので、回転速度分布として $C\omega(\omega^2+a^2)^{3/4}$ が各モデルに与えられている。(Cはパラメータ)。

この結果、次のようなことが言える。

- (1) 局所線型理論で臨界安定な銀河円盤は、弱い棒状構造(10%以下の振幅)を示す。このとき、速度分散はほとんど変化していないことが確かめられる。
- (2) 局所線型理論で不安定な領域が中心部にある円盤 ($m=10$) は、中心部に形は小さいが際立った棒状構造を持つ。更に $\xi=0.5$ 付近に、 $t=9$ あたりで楕円形の環が作られる。

いずれにしても、今までの N 体数値実験のような、円盤全体に広がる棒状構造はできそうにない。また、円盤を作っている星の角運動量もほとんど輸送されず、全体として穏やかな印象を与える。

6. おわりに

以上の結果から推して考えると、局所線型理論で臨界安定な円盤は、大局的扱いの場合と同じくヴラソフ方程式によるシミュレーションの場合も、棒状構造に対して不安定である。しかし、非線型効果はわりと早く効いて円盤全体の構造が極端に変化することはなさそうである。これは、 N 体数値実験とは異なる。不安定模様の出方もやはり N 体数値実験とは異なる。図4にホールによる N 体数値実験の結果を示しておいた。最初に、円盤の外側に渦巻状の構造がかすかに現われ、その後次第にいろいろな形に変形しながら円盤が棒状に変化していくのが見られる。ミラーによる N 体数値実験でも、円盤は、まず、角が3ないし4個あるアメーバの様な形に変形し、その後棒状構造が現われるという、同じ傾向を示している。ヴラソフ方程式による場合には、最初から棒状構造に対応する模様は出現しており、より短い波長の構造はそのあとから出現する。

N 体数値実験の場合、 N として 10^5 程しかとれず粒子数の統計的ゆらぎによる影響は避けられない。また、

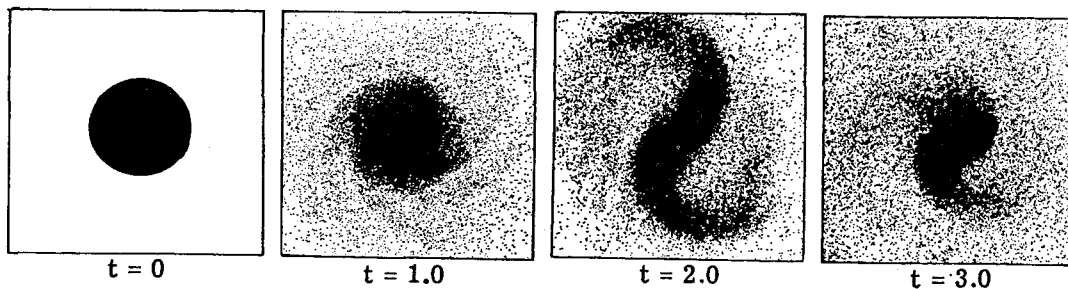


図4 ホールによる N 体数値実験の例。粒子数 N は 10^5 で、トゥームレの最少速度分散を持つ有限半径の円盤のシミュレーションである (Hohl, F., 1971, *Ap. J.*, 168, 343-359 より)。

分布関数という見方では、 N 体数値実験の場合、何本かの細かい粒子線の重ね合わせと同じ形の分布関数になる。これらはどちらも短い波長の不安定性をひき起こす可能性がある。このためブラソフ方程式を直接数値積分する方法は、穏やかに進化する系の非線型現象を調べる場合に優れているといえるだろう。

最近、多くの銀河円盤の回転速度はある半径以上の所で一定であることが、中性水素の電波観測や分光観測で言われている。より現実に近いモデルのシミュレーションとして、こんな銀河の数値実験も重要である。このモデルは線型大局の取り扱いでザングが調べており、 N 体数値実験でも調べられている。従って、上述の事柄を確かめるためにも、更に数値実験が必要である（ちなみに、筆者らの計算では、1つのモデルを $t=9$ まで計算するのに FACOM M200 で2時間弱かかりけっこう高い計算になります）。

『中国大百科全書』

天文学

全80巻中の1巻
B5判/約700頁
挿絵800点
特製本/定価8,000円

●おもな内容と特徴

★ 本書は、著名な 200 余名の天文学者が執筆、総字数160万字、1,073項目にのぼり、天文学史、天文器械と方法、天体測量学、天体力学、理論天体物理、空間天文学、太陽、太陽系、恒星と星雲、星系と宇宙学を包括し、学術性高く、完璧な内容である。

★ 古代中国は、天文学の分野ですぐれた成果をあげている。本巻では、天文学史が占める分量のうち半は、中国古代天文学の紹介であり、この部分は内外読者の興味をそそるものと期待される。

★ 天文学に関する中国の文化遺産と発明・発見のすべてを世界人類の知識の宝庫に貢献することは真によろこぶべきことであり、本書の刊行は日本と世界の人びとの熱望と期待に応えるものと確信する。

中国大百科全書出版社 (株) 新百科社
発売元 日本総代理店 東京都港区西新橋1-20-9和田ビル6F
TEL 03 (501) 2850

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価350(〒49円) '81-3 月号・2月5日発売!

●3月号のおもな内容

- ★ボイジャー1号が送ってきた土星の衛星の写真を中心に、カラーページと本文で村山定男さんが解説します。
- ★3月の観測ガイドは、アルデバランの食、冥王星をさがそう、の二つをテーマにおなじみの藤井旭さん。
- ★1981年3月13日は、ウィリアム・ハーシェルによって天王星が発見されてからちょうど200年。発見物語を齊田博さんにお願しました。
- ★電子式シャッターは、電源の閉めでシャッターを閉じることができません。この便利な装置の製作記を、奥村正己さんから。
- ★ほかに、コスモス批評、スペクトルの話など……………

好評書

天文年鑑 1981年版

毎月の空のほか、惑星、小惑星、流星、彗星、新星、変光星、日食、月食などのこまかなデータを掲載。その他天体観測に最低限必要なデータなどもりたくさん内容。

■天文年鑑編集委員会編/定価480円発売中

四季の天体観測

—肉眼・双眼鏡・小望遠鏡で—

刊行以来好評であった『新版・四季の天体観測』を全面的に書きかえ、新しい写真、新しい数値であらたに発売。

■中野繁著/定価2300円・最新刊発売中

誠堂新光社 東京都千代田区神田錦町1-5
換替東京6294 電話03(292)1211