

# 楕円銀河の形成と進化

野口 正史\*

## 1. はじめに

楕円銀河が注目を集めつつある。というのは、最近詳しい観測がなされた結果、従来の銀河進化論が大きな修正を迫られているからである。華麗な渦状銀河と比べると、どちらかという目立たない楕円銀河であるが、銀河形成を理解するための一つの鍵となりうることもわかってきた。このような状況を受けて、楕円銀河の新しい進化モデルが提出されているが、本稿では主に力学的側面に注目し、従来のモデルも含めてそれらが観測結果をどのように説明できるか（あるいは、できないか）を概観してみたい。更に一步遡って、銀河形成論についても触れようと思う。

## 2. 楕円銀河の力学的性質

渦状銀河に比べて、楕円銀河の力学的性質は、従来ほとんどわかっていなかった。わずかに、中心付近の速度分散や、回転速度が測られていたにすぎない。楕円銀河には扁平なものが多いが、当然のことながら、それらは主に回転しているために扁平になっているものと考えられてきた。しかし 1970 年代後半以降、口径 4 m クラスの望遠鏡を駆使して詳しい観測がなされると、いろいろ興味深いことがわかってきた。特に著しいのは回転速度が予想に反して非常に小さいということである。現在、30 個以上の楕円銀河についてかなり外側までの回転速度と速度分散が測られている。それによると、回転曲線の形は、剛体回転的なものや外側まで平坦なものなどいろいろあるが、回転速度の最大値は数十  $\text{kms}^{-1}$  程度のものがほとんどである。因みに渦状銀河では 200  $\text{kms}^{-1}$  程度である。一方速度分散は、外側にいくにつれて減少するものやほぼ一定値をとるものなどやはりさまざまであるが、中心における値は 200~300  $\text{kms}^{-1}$  のものが多い。

力学的な議論をする上では、回転速度の最大値  $V_{\max}$  よりも、それを中心における速度分散  $\sigma$  で規格化した値  $V_{\max}/\sigma$  を使う方が便利である。図 1 に、32 個の楕円銀河について  $V_{\max}/\sigma$  とみかけの扁平度  $\epsilon$  の関係を示した。図中の実線は、楕円銀河が回転のみによって扁平な形状になっている場合に期待される  $V_{\max}/\sigma$  と  $\epsilon$  の関係を示したものである。観測される回転速度は、扁平

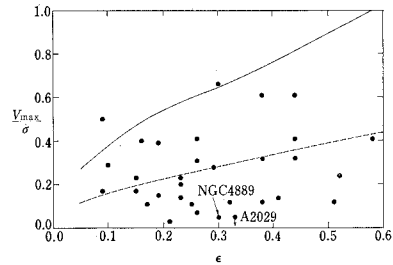


図 1 楕円銀河の扁平度  $\epsilon$  と  $V_{\max}/\sigma$  の関係。黒丸はシュクターとガン (1979) などによる観測値で、それぞれが 1 個の銀河を示している。実線は速度分散が等方的で回転によって扁平になっている場合の  $\epsilon$  と  $V_{\max}/\sigma$  の関係である。また破線は非等方的速度分散をもった扁平スフェロイドについての結果を示す (ピニー, 1978)。

な形状を支えるにはかなり足りないということがわかると思う。これは、銀河を一般には傾いた向きから観測しているということでは説明できない。傾いた向きから見ると確かに回転速度は実際よりも小さく観測されるが、同時に扁平度も小さく（丸く）なる。この効果は、回転だけで形が扁平になっている場合には、ほぼ実線に沿った左下への移動として表わされる。したがって楕円銀河がもし回転だけで扁平になっているとすれば、傾きがどうであれ観測点は実線からはずれることはないのである。このように扁平形状を回転だけで説明するのは無理なことがわかった。

それでは、楕円銀河はどのようにして扁平な形を保っているのだろうか。回転だけで扁平になっているということはいいかえれば速度分散が等方的であるということである。流体の場合のマクローリンスフェロイドのようなものであると考えてよい。ところが楕円銀河のような無衝突恒星系では流体と異なり粒子（星）が互いに“すりぬけて”運動することができるので速度分散が非等方的になることもある。そのような場合には、系はたとえ全然回転していなくても、速度分散の異方性によって扁平形状を保ちうるということがピニー (1978) の研究でわかった。つまり、扁平スフェロイドのような恒星系は、極方向に比べてそれに垂直な（赤道面に平行な）方向の速度分散が大きければ回転していなくても平衡系となりうるのである。適当な異方性の度合を仮定して  $V_{\max}/\sigma$  と  $\epsilon$  の関係を求めてみると図 1 の破線のようになり、観測データと合わせることができるとピニー (1978)。扁平スフェロイド（ラグビーボールのようなもの）でも同様な

\* 東京天文台 Masafumi Noguchi: Formation and Evolution of Elliptical Galaxies

ことがいえる。楕円銀河は実際に扁平かそれとも扁長かという問題は多くの議論があり決着はついていない。ここでは一応扁平なものと考えておきたい。

このように、楕円銀河の扁平な形状は回転ばかりでなく速度分散の異方性にもよるものであることが明らかになった。興味深いことに、従来楕円銀河と同じような過程で形成されたと考えられてきた渦状銀河のバルジは等方的速度分散の場合に予測されるように速く回転しているものが多い。

### 3. 進化モデル

以上のように、現在見る平衡系としての楕円銀河の力学的性質は大雑把ではあるが理解できた。それでは楕円銀河はどのようにして現在の姿になったのだろうか。銀河の形成・進化を考える場合に、初期の宇宙で密度や速度のゆらぎが生じ、それらが現在我々が見ている銀河になるまでを一貫して扱えることが理想であるが、現在の所、銀河が原始銀河として一つの独立した天体になるまでの歴史と、原始銀河から現在の姿に至るまでの歴史が別々に論じられることが多い。そこで本稿では、便宜的に前者を「銀河の形成」、後者を「銀河の進化」と呼ぶことにしたい。

楕円銀河の進化のモデルとしては従来ゴット (1973, 1975) とラーソン (1975) のものがある。ゴットは星だけから成る原始銀河が重力によってつぶれ、激しい緩和過程を経て現在見る楕円銀河になったというモデルを提唱した。一方、ラーソンのモデルでは、楕円銀河はガス状の原始銀河から進化したと考える。ただしこの場合、星の形成、ガスの衝突によるエネルギー散逸、粘性による角運動量の輸達といった物理過程のタイムスケールが自由落下のタイムスケールと同程度でなければならない。彼らのモデルでは原始銀河は球状であり、角運動量が大きいもの程扁平な楕円銀河となる。どちらのモデルでも進化の最終状態においては、実際の楕円銀河の光度分布が再現される。特にラーソンのモデルでは等光度線の形までうまく再現できるために大いにもてはやされた。しかし、前章で述べたように楕円銀河があまり回転していないことがわかってくると、モデルの欠陥が明らかになった。彼らの得た最終状態を図1にプロットするとほとんど実線上ののってしまうのである。回転によって扁平になっている系ができたわけである。

このようにゴットやラーソンのモデルは楕円銀河の回転速度が小さいという事実を説明できない。どこに原因があるのだろうか。進化を記述する物理学 (恒星系の重力的な振舞や星形成のメカニズム等) が正しくないということも考えられるが、ここでは彼らの採用した初期条件 (原始銀河の状態) を疑ってみることにしよう。彼ら

は球状の原始銀河を考えたので扁平な銀河を作るためには回転を充分与えておく必要があった、しかし、原始銀河がそもそも扁平であったらどうだろうか。実際原始銀河は平衡系ではないのだから、球状というよりも扁平あるいは不規則形状であるという方が考えやすい。このような場合、それほど回転がなくても進化の末に扁平な系ができそうに思われる。実際そうであることがアーセスとビニー (1978) によって示された。彼らは、扁平な恒星系がつぶれると、若干丸くはなるもののやはり扁平な恒星系ができることを  $N$  体計算によって明らかにした。そして、これらの系では、主に速度分散の異方性によって扁平な形状が保たれていることがわかった。しかし、彼らのモデルは、初期条件として扁平度が 0.85 以上、いいかえれば軸比が約 7:1 以上の非常に平べったい形状しか考えていないし、特に観測結果の再現を目的としたものでもない。

そこで筆者は、より現実的な進化モデルを作るために、ゴットやラーソンの原始銀河に比べゆっくりと回転しているいろいろな扁平度のスフェロイド状恒星系の進化を  $N$  体問題として調べてみた。  $N$  体問題では、粒子系が自己重力により行なう運動を計算する。重力の計算に3次元格子を用いるが格子サイズ以下の細かい重力場の変化は無視される。したがって、粒子数を充分大きくとれば系は実質的に無衝突であると考えてよい。筆者の計算では粒子数は 50000、格子は  $16 \times 16 \times 16$  とした。初期条件を表1に示した。進化モデルでは初期条件、つまり原始銀河の物理状態は与えられたものとして扱うなるべく根拠あるものであることが望ましい。その根拠を与えるべきものは銀河形成論である。形成論については次章で述べるが、ここでは表1の回転速度 (と速度分散) は、重力的集団化理論 (Gravitational Clustering Theory) という1つの形成論にのっとったものであることを指摘しておきたい。

さて、いずれのモデルにおいても、系は自由落下時間の10倍程度 (数億年) でやはり扁平スフェロイド状の平衡状態に落ち着くことがわかった。これらの平衡状態について  $V_{\max}/\sigma$  と  $\epsilon$  の値を観測値と比較したのが図2である。観測データの散らばりはモデルに比べて大きい。固定した  $\epsilon$  についてみると、  $V_{\max}/\sigma$  の観測値の平均はモデル値と割合良く一致している。図3に最も扁平なモデル U3 の平衡状態について回転速度と速度分散のプロファイルを示した。赤道面に平行な方向の速度分散が極方向の速度分散より大きいことがわかる。回転だけでなく、この異方性が扁平形状に寄与していると考えられる。一方、平衡状態の密度分布はいずれのモデルでも、外側にいくにつれて観測から推定されるよりも急激に減少することがわかった。しかし、これはモデルが単

表 1 モデルの初期条件

モデル	密度分布	扁平度 <sup>1)</sup>	回 転	回 転 速 度 <sup>3)</sup> (単位 $(GM/a)^{1/2}$ )	速 度 分 散 <sup>4)</sup> (単位 $(GM/a)^{1/2}$ )
U1	一様スフェロイド	0.0	剛体回転	0.200 <sup>5)</sup>	0.316
U2	同 上	0.3	同上	0.211 <sup>5)</sup>	0.334
U3	同 上	0.5	同上	0.220 <sup>5)</sup>	0.348
N1	非一様スフェロイド <sup>2)</sup>	0.0	一定速度	0.169	0.309
N2	同 上	0.3	同上	0.163	0.364

1) ここでの扁平度は  $1-b/a$  で定義されている。但し、 $a, b$  はスフェロイドの赤道半径と極半径。  
 2) 次式で与えられる密度分布を採用した。

$$\rho(x, y, z) = \rho_0 \left[ (k^{-2/5} - 1) \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} \right) + 1 \right]^{-5/2}$$

$$= 0 \quad \begin{cases} \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} \leq 1 \right) \\ \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} > 1 \right) \end{cases}$$

但し、 $k=0.1$

3), 4) これらの値は、gravitational clustering theory によって予測される原始銀河の性質 (エフタシオとジョーンズ, 1979) に基づいて決めた。速度分散は等方的に与えてある。 $M$  はスフェロイドの質量。回転速度はゴットやラーソンのモデルよりもかなり小さい。  
 5) 赤道における値。

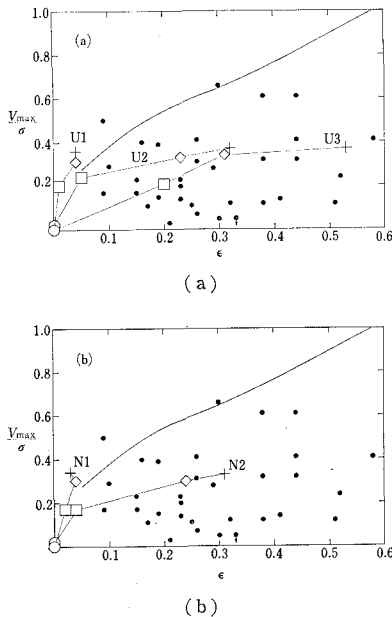


図 2 モデル計算の最終平衡状態について  $\epsilon$  と  $V_{max}/\sigma$  を図 1 の観測値と比較したもの。(a) はモデル U1, U2, U3, (b) はモデル N1, N2 についての図である。細い実線で結ばれた  $\times, \diamond, \square, \circ$  は、系をそれぞれ  $90^\circ$  (edge-on),  $60^\circ, 30^\circ, 0^\circ$  (face-on) 傾けて見たときに得られる  $(\epsilon, V_{max}/\sigma)$  を表わす。太い実線は図 1 と同じ。

純すぎるためであり、それ程深刻な困難ではないと思われる。詳しくは述べないが、たとえばゴット (1975) が行ったように cosmological infall のような効果を取り入れることで解決できるのではないかと考えている。

このように、楕円銀河は、あまり回転していない一般には扁平な原始銀河が、ほとんどエネルギーの散逸を伴

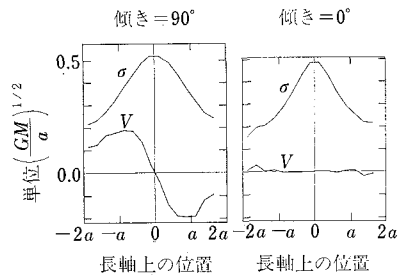


図 3 モデル U3 の最終平衡状態の回転速度  $V$  と速度分散  $\sigma$  のプロファイル。左図は赤道面方向から見た場合、右図は極方向から見た場合である。左図の方が速度分散が大きくなっていることに注意。

わずにつぶれて現在の姿になったと考えてよいようである。後述するように別の可能性も考えられるが、ここではひとまず以上のように考えておこう。少し大袈裟に言えば、我々は現在みる楕円銀河から遡って原始銀河までたどりついたわけである。ここで更に時代を遡って銀河形成の話に移ることにしよう。

#### 4. 楕円銀河の力学と銀河形成理論

まず、楕円銀河しか考えていないのになぜ銀河形成を論じるのかという疑問に答えておこう。渦状銀河の進化では、ディスクの形成に見られるように、エネルギー散逸過程が重要な役割を果している。したがって非常に単純化して考えれば、渦状銀河の現在の性質は初期条件よりもむしろ進化の物理的過程によって決まってしまう、理論モデルを観測と合わせる場合に原始銀河にはかなりの任意性が許されるといえるだろう。それに対して、楕円銀河は無衝突恒星系としてほとんどエネルギーの散逸なしに進化したと考えられる。したがって、激しい緩和

という過程は経ているものの、渦状銀河に比べれば、原始銀河時代をかなり良く記憶していると思われる。いいかえると、楕円銀河の現在の姿をもとにして推測される原始銀河像の方がより限定的であり、銀河形成理論をテストするには有利と考えられるのである。

銀河形成に関してはいくつか理論が提唱されているが、本稿では重力不安定性理論と呼ばれているものに話を限ることとする。これは宇宙初期に存在した密度ゆらぎが重力不安定性により成長して原始銀河や原始銀河団になったというものである。密度ゆらぎとしてどのようなものを考えるかによって2通りの理論がある。

1つは、輻射と物質が同じように粗密を作る（フォトンとバリオンの密度比が場所によらず一定）ようなゆらぎを考えるものである（断熱的ゆらぎ）。質量が  $10^{12} M_{\odot}$  程度より小さいゆらぎは粘性や熱伝導によりプラズマ中性化の時点までに減衰してしまう。生き残った  $10^{18} M_{\odot}$  程度以上のゆらぎは重力不安定性により成長して平べったいパンケーキ状のガス雲となるが、これが原始銀河団あるいは超銀河団と考えられる。原始銀河そのものは、パンケーキの分裂によって形成される。これはパンケーキ理論と呼ばれ、ゼルドビッチ等によって長らく研究されてきた。

これとは別に、輻射は一様で物質だけが粗密をつくる場合が考えられる（等温的ゆらぎ）。このようなゆらぎは減衰を受けないので、プラズマ中性化後、その時点のジーンズ質量  $10^5 M_{\odot}$  より質量の大きなものは重力不安定性により成長をはじめ。ピープルスとディッケ (1968) は、このことをもとに、まず球状星団が形成され、それらが重力によって集まって原始銀河が形成されると考えた。更にこれらが集まって次々と大きな銀河集団がつくられたということになる。これを重力的集団化理論 (Gravitational Clustering Theory=GCT) と呼ぶ。

この2つの理論のどちらが正しいか（共に誤りであることも考えられるが）という問題に取り組む1つの方法は、銀河の分布を調べることである。もし、銀河がパンケーキの分裂で形成されたとすれば、当然パンケーキは銀河の分布になごりとどめていであろう。銀河は、パンケーキに対応するあるスケールでもっばら集団化しているはずである。これに対して GCT が正しいければ、銀河団あるいは超銀河団サイズに至るまでのいろいろなスケールの集団が見つかるだろう。GCT を支持する人々は、銀河の分布を定量的に調べるために相関関数というものを計算し、観測される分布の相関関数が GCT の予測する相関関数と良く一致するということを強調した。しかし、シャンクス (1979) は、相関関数が銀河の分布の仕方にそれほど敏感な量ではないことを指摘している。また、スケールが 25 Mpc の銀河集団しかない分

布モデルと、25 Mpc までのいろいろなスケールの集団がある分布モデルをつくり、それらにミードの解析という方法を適用した所、前者の方が実際の分布と良く合うことを見つけている。これは、銀河が直径 30 Mpc 程度の空白域 (void) をとりまくフィラメント状（あるいはハチの巣状）の構造を作って分布しているという観測結果（たとえばディビス等、1982）とも合致するが、これらを説明するにはパンケーキ理論の方が都合が良いだろう。しかし、銀河の3次元分布を調べるのはむずかしく、void についても存在を否定する人もいる。決着はついていないというべきだろう。

話が横道にそれてしまった。すでに述べたように、筆者の楕円銀河進化モデルは GCT の予測する原始銀河像に基づいたものである。その結果、実際に観測される楕円銀河の力学的性質をかなりうまく説明できたのであった。なぜ GCT を選んだのかといえば、GCT では原始銀河形成の過程が  $N$  体シミュレーション等により定量的にもかなり詳しく調べられていて（たとえば、エフスタシオとジョーンズ、1979）、進化モデルの初期条件としてインプットするのに都合が良かったからである。また、GCT では原始銀河の角運動量は相互の潮汐作用により生じるので、速く回転しているものはできにくい。このことは、楕円銀河があまり回転していない事実を説明するのに好都合なのである。ついでに述べておくと、渦状銀河の速い回転は従来 GCT の泣き所とされていたが、まず最初にハローが重力的につくられ、その中で残ったガスがエネルギーの散逸により中心に落ち込んでディスクができたと考えれば説明がつく。

もちろん、だからといって、GCT が唯一の正しい理論であるということにはならない。他の理論でも同様な帰結になるかもしれない。確実に言えるのは、GCT が楕円銀河の力学という銀河形成論にとっての1つのテストをパスしたということである。GCT が正しい理論であれば、現在知られている他の観測事実も説明できなければならない。

最近、ディビス達 (1983) によって、楕円銀河の明るさと  $V_{\max}/\sigma$  の値に相関のあることが発見された。明るいもの、いいかえれば質量の大きいもの程  $V_{\max}/\sigma$  が小さいのである。ところが GCT に基づくと観測される程強い相関は予想されない。また、銀河の分布が GCT にとって不利となるかも知れないことはすでに述べた。

銀河形成論をテストするには、宇宙をより遠くまで（時間をより過去まで）観測し、実際に原始銀河が形成されている現場を見る方法と、これより間接的ではあるが、理論の与える原始銀河像をもとに銀河の現在の性質を予測し、それを観測と比較するという方法とが考えられる。前者が実行できればもちろんそれで良いわけだ

が、銀河進化の正しいイメージを得るためには後者の研究も欠くことはできない。本稿ではその一例として筆者の仕事を述べたが、今後いろいろな形成論について同様な研究が望まれる。

## 5. マージング説について

以上、楕円銀河が原始銀河時代から孤立系として進化したという立場で話をしてきたが、楕円銀河が2つ以上の銀河の衝突・合体（マージング）によって生まれた2次的な天体であると考えている人もいる（マージング説）。

この考え方によれば、マージングを何回もくり返すうちにいろいろな方向の角運動量ベクトルをもって回転している銀河が足し合わされることになり、結果的にはあまり回転していない系ができるというわけである。また、観測されているように、明るいもの程回転がゆっくりしているということにもなるだろう。しかし、マージングの理論的取り扱い、特に数値計算は困難なため、はっきりとしたことはわかっていないようである。またマージング説は、マージングの種となる最初の天体がどのような性質のものであるかについては答えない。したがって種次第でどのような銀河でも作れることにもなりうる。このようなわけで、マージング説だけで楕円銀河のすべてを理解しようとするのは無理がある。

もちろん、マージングという現象自体が実際に起こっていることは充分ありうる。特に銀河団の中心付近によく見つかる巨大楕円銀河（cD銀河）などは、マージングによって形成された天体の有力候補であろう。図1の中でNGC 4889とA 2029は、それぞれ、コマ銀河団、アーベル2029銀河団中のcD銀河であるが、回転速度が著しく小さい。これらは、銀河団の中心に鎮座して近傍を通過する銀河を次々とつかまえて吸収した結果、ほとんど回転がなくなったと考えられないこともない。またcD銀河には複合核をもつものも多いが、これも、のみこまれた銀河がまだ完全に消化されないで残っている状態と考えれば理解しやすい。

## 6. おわりに

一見単純な楕円銀河の形成・進化にもいろいろと複雑な問題がからんでいるようである。本稿でみたように、現在の所最終的な結論は得られていない。化学進化や中心核の活動といった問題も重要であるし、銀河形成まで話を広げれば、重力不安定性理論以外の理論もあることを忘れてはいけぬ。それらについては、筆者は適任ではないと考え割愛した。また、本稿でもわかりやすくするために話を単純化した所があることもおことわりしたい。近い将来に銀河の歴史の全貌が明らかになることを願って筆を置くことにしよう。

## 雑 報

### 黒点数の非動径振動効果

C. L. Wolff (Astrophys. J. **264**, 667, 1983) は最近あまり他に例をみない非線型作用について議論している。230年にわたる黒点数の観測から、11年周期やゆらぎと黒点数との相関などをのぞいた資料をつくり、これを周期解析にかけたところ、内部の回転の影響を受けた重力波的な固有振動モードのスペクトルが美事にあらわれた、という。黒点の出現にはいわゆる活動的経度という剛体回転をするような成分が知られているが、長周期非動径振動周期が頻度分布のスペクトルにあらわれるのは何故か、これが彼の力説する点である。2ヶ月以上1年といった固有振動周期の重力波モードは1つ1つは減衰する安定モードと考えられるが、それぞれがある位相関係をもつと、いずれ合成されて大波となる機会がある。その大波が ${}^3\text{He}$ の燃焼に働いて各振動モードを励起すると彼は主張する。その大波はまた対流層の深部にも作用して、黒点となる磁力管を浮上させる。大波はばらせば非動径振動であるが、集合して大波として物理的作用

をするというわけである。1種のホドクラフィーであるという。

${}^3\text{He}$ 燃焼を考えるより、直接黒点に関係のある対流層の自励機構を考える方がよいように思うが、いずれにせよ注目に値する考えであるといえる。（海野和三郎）

## 学会だより

### 月報購読料の改訂について

昭和50年以降9年間据え置いて来ましたが月報購読料を来年1月号より下記の通り改訂いたします。

会員以外の方で月報を購読されている個人又は団体の皆様には誠に申し兼ねますが何卒御了承の上、引き続き御愛読の程御願ひ申し上げます。

記

月報購読料 1部 450円（送料共）