

計算機の中の銀河

松田卓也*, ソレンアクセル・ソレンセン*

1. 銀河の渦状構造

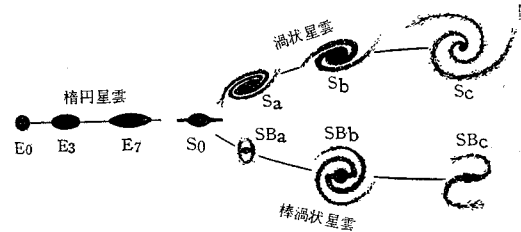
天体写真集などを見て最も心をうばわれるものは、あの壮大な渦状銀河であろう。腕がキリキリ巻きこんだものから、比較的緩やかに二本の腕が巻いているものまで、または真正面から見えるものから真横から見えるものまで、さらには腕の先に伴星雲を伴った子連のものまで様々ある。銀河の種類には今言った渦状銀河の他に、のっぺりした楕円銀河、型が不規則な不規則銀河がある。しかしそのなかでも渦状銀河の占める割合は 60~70% にも及び、渦状銀河こそ型の美しさと言い、数と言い、正に銀河の代表と言うにふさわしい。渦状銀河の中には通常のものと同棒状銀河がある。それらを一貫して分類したものがハッブルの分類であり、次のようになっている。

$$E-S0 \left\{ \begin{array}{l} Sa-Sb-Sc \\ SBa-SBb-SBc \end{array} \right. I$$

ここでEは楕円銀河、Sは渦状銀河、SBは棒状銀河、Iは不規則銀河をあらわす。小文字のa~cは腕の巻き込みの程度をあらわし、aの方がきつく巻いている。

さてここでは主として渦状銀河(棒状銀河を含めて)について述べる。渦状銀河は主として二つの部分、つまり中心核と円板からなっている。中心核は銀河の中心に位置する球状の星の集団であり、全体として剛体的に回転している。円板は星とガスを含み、微分回転しているのが特徴的である。渦状腕はこの円板上にあらわれる。渦状腕を構成しているものは明るい若い星とそれに伴うH II領域である。これらのものはガスから生れたばかりであるので、渦状腕を構成しているものは星と言うよりはむしろガスと言った方が適当であろう。渦状腕内での(古い)星の数はそれ以外の部分よりも5%程度多いにすぎないと言われている。銀河の中でガスの総質量が占める割合は、銀河の型によって異なるのだが、渦状銀河の場合、全体の5~10%程度である。このようにガスは質量としては重要でないのだが、渦状腕を作るには本質的な役割をはたしているように思える。

ここまでは観測的なことを述べたが、それでは次に渦状腕がどうして存在するのかを考えてみよう。これは昔



第1図 ハッブルの星雲系列

から考えられていながら、なかなかうまい解答のない問題であった。渦状腕の問題は二つにわかれる。一つはどうしてそれを生成するかという事である。もう一つはそれをどうして長持ちさせるかである。銀河の回転周期はほぼ $2 \cdot 10^8$ 年であるので、渦状銀河は生れてこのかた、ほぼ50回転したことになる。この50回転の間、渦状腕をどうして保つかというのが第二の問題なのである。第一の問題はそれほど難しくない。例えば、後に述べるように、二つの銀河がすれちがったとすると、互いの重力による潮汐作用のため、きれいな二本の腕ができるのである。問題は第二点にある。

渦状腕を構成している星なりガスが常にその中にとどまるという考え方を実体腕の考えとよぼう。つまり腕は一つの実体からできているという考えである。これは古来からとられてきた考えで、磁場によって腕が安定化されるという磁場説もその一つである。しかし実体腕の考えには重大な欠陥がある。先にも述べたように円板は微分回転(角速度が半径によって異なる)しているので、実体腕は円板が数回転するうちにギリギリと巻き込んでしまっ、とても50回転はもたない。巻き込むことによってScからSb, Saへと進化すればよいと考えられるかもしれないが、とてもそれどころではないのである。

この欠陥を救うものとして近年、脚光をあびてきた説がリンとシュウの提唱した、渦状腕の密度波理論である。この説の本質は次の二点である。渦状腕を作る原動力は重力であって、磁場などは副次的な効果しか及ぼさない。渦状腕は実体ではなく、密度の高い部分が波のように進んでいく密度波である。この第二点が巻き込みの困

* 京都大学工学部航空工学

T. Matsuda, Soren-Aksel Sorensen, Galaxies in a Computer

難を解決する。彼らはこの考えにもとづいて、星の密度のゆらぎが小さいと仮定した線型理論を用い、定常な星の密度波を得た。眼に見える腕はガスでできている。星が作る小さな密度波の中をガスが流れるとき、衝撃波が発生し、腕の部分で急にガス密度が上昇し、星が生れる。この考えは藤本により提案され、ロバーツたちが計算して観測とのよい一致を得ている。このように観測との比較の点からも密度波理論はひじょうに魅力的な説であると言えよう。

ところが密度波理論も順風満帆というわけにはいかない。たとえ密度波が作られてもそのエネルギーは内か外へ伝播していってしまい、密度波は銀河の数回転の時間スケールで減衰してしまうことがわかった。だから定常な渦状腕を得るためには、何らかの機構でエネルギーを供給してやらなければならない。

さらに言えば、多くの密度波理論は線型理論として解析的にとり扱われてきた。しかし自然界の現象は線型理論（あるいは級数展開ていどの非線型理論）でとり扱われるものばかりではない。それどころか非線型性こそが本質であるという現象も多く（最近までの自然科学は極力そういった問題を避けてきた）、解析理論は早晚、行きづまる可能性がある。こういった欠陥を克服するのが次節以下で述べる数値実験である。

2. 電子計算機による数値実験

天文学が物理学や化学と異なる一つの特徴は実験ができないことであろう。自然科学というものは単に自然界の現象を記述するだけにとどまらず、その現象の中の因果関係を知らねばならない。つまり何が原因でその現象をひきおこしたのかを知りたいわけである。ところが自然界は複雑であるので、いろいろな原因が複雑に絡まりあって、一つの結果を生み出す。だからその多くの原因のうち、何か本質的で何が副次的なものかを知るのには難かしい。

それを解決する一つの手段が実験である。たとえば物体の落下という現象を考えてみよう。石と紙を同時に落下させると、当然、石の方が速く落ちる。この事から、落下速度は質量に比例するという（昔の）誤った考えがでてくる。しかしこれは重力と空気の抵抗という二つの原因が絡りあって生じた結果である。真空中でこの二つを落下させる実験を行うと同時に落下する。このように実験は、周囲の条件を純粋化したりコントロールしたりすることによって、因果関係を正しく理解させてくれる。このようにして実験は物理や化学の進歩のための大きな手段となった。

天文学においても周囲の条件が比較的純粋な問題、例えば惑星の運動の理論などが早くから進歩したのはこの

ような理由もあろう。しかし星の進化や銀河の構造といった問題は、ひじょうに多くの周囲の条件を持っているので、ある現象の本質が何かを知るのには極めて困難であった。さらにそのような対象では、条件を純粋化する実験という手段もとれない。

このような事情を変えたのが電子計算機の発達であろう。例えば星の進化の問題を考えよう。星の進化は多くの複雑な要素によって規定されている。例えば、質量、化学組成、対流理論、核燃焼率……。電子計算機はこれらのすべてを組みこんで数値計算し、ある一定の条件に対して星がどのように進化するかを教えてくれる。他の条件はそのままにして、一つの条件だけ（例えば質量）を変えて計算する事により、その条件がどれだけの重要性を持っているかを知ることができる。このように電子計算機では周囲の条件を人為的に純粋化したりコントロールしたりできるのである。この意味で、電子計算機による数値計算は正に実験、数値実験とよぶことができる。数値実験がいかに天文学の地平を切りひらいてきたかを、銀河の渦状構造について以下に見よう。

3. n 体問題

いま n 個の質点が相互の重力で引きあって運動している問題、いわゆる n 体問題を考えよう。この問題は一見、電子計算機にとって、ひじょうに簡単な問題のように思えるが実際はそうではない。この問題を、解決のアプローチの方法に応じて三つに分類しよう。

- (a) n 個の質点相互の重力を精密に計算して、 n 個の質点の運動を決定する。これが本来の n 体問題である。
- (b) 空間を網目に分け、重力を計算する段階ではセル（網目の一つ）の中の質点はすべてセルの中心にあるとして平均重力場を計算する。各質点はこの平均重力場の中を運動する。
- (c) 二つの粒子だけが質量を持ち、他の粒子はすべて質量のない試験物体と考えて、それらの運動を計算する（制限三体問題）

(a) の方法が最も好ましいようであるが、それには重大な数値的困難がある。 n 体の質点のうち 2 体が接近したとすると、数値計算上の時間ステップとか精度とかはほとんどこの 2 体で決ってしまう。2 体が接近すればほど計算時間は長くなり精度も落ちる。これを解決する方法もないことはないのだが、計算時間を喰う。そのようなわけで (a) の方法では n がせいぜい数百の場合までしか、現在の計算機ではとり扱えない。

数百体では銀河をあらわすのにまったく不適當である。現実の銀河では、2 体の星が接近することによりその軌道が大きく変ること（2 体衝突）はほとんどない。このような系を無衝突系とよぶ。銀河を数百体で表現す

ると、1つの質点は1つの星に対応するのではなく、10億個の星をあわせたものに対応する。このような系は無衝突ではあり得ないのである。以上のような理由で (a) の方法は星団とか銀河集団の力学を計算するには適しているが、銀河にはまったく適していない。そこで (a) についてはこれ以上述べない。以下に (b) と (c) を少し詳しく解説しよう。

4. 無衝突系の数値計算

ここでは (b) について述べる。銀河円板はひじょうに薄いので、計算上の簡単のため、厚みがないと仮定する。すると計算は2次元問題に帰着する。この2次元平面の上に5万~10万個の質点を考える。先に述べたような方法で平均重力場を計算し、その重力場の中の個々の質点の運動をニュートンの運動方程式にもとづいて計算する。この方法では1つのセルに入った2つの質点の間には重力が働かないように仕組まれている。そう言うと不正確なようだがそうではない。10万個の質点を考えても、1個の質点は100万個の星を集めたものに対応している。だからセル内で重力を正確に計算すると、この系はもはや無衝突系ではなくなる。セル内の重力を切るにより2体衝突を無視して、少い数の質点で現実の銀河をシミュレートできる。

この種の計算は Miller, Prendergast & Quirk, Hohl & Hockney, Sorensen たちにより行なわれている。それぞれの差は主として質量分布から平均重力場を計算する方法に存する。Miller たちはいろいろな量をフーリエ分解することにより重力を求めた。そのため、あらゆる量が二重周期関数になっている。だから彼らの銀河モデルは孤立系になっていない。1つの銀河の上下左右に無限個の同一の銀河が格子状に規則正しく配列しているのである。彼らの計算では確かにきれいな渦状腕が得られているが、これが無限個の虚像の銀河によってできたのではないという保証がない。さらに彼らの空間と速度空間が離散的になっているのも欠陥の1つである。彼らの計算のもう1つの特徴は星の他にガス雲も考え、さらにガス雲からの星の生成も考慮したことであろう。ここでガス雲というのは、非弾性衝突をする質点としてモデル化されている。渦状腕を示すのはガス雲成分であって、星成分でないことは興味深い。

Hohl たちの計算は前者の欠陥を除くため、重力の計算に特別な工夫がしてある。彼らもやはりフーリエ法を用いているが、ある空間領域(そこに銀河がある)の囲りを真空の領域で囲むことによって系を孤立化させることに成功した。彼らは星のみの系を計算した。Sorensen は重力の計算を前二者とは異って、フーリエ法ではなく、各セルの及ぼす重力を直接加算する方法をとった。この

方法ではもちろん、系は孤立している。計算結果は Hohl たちのものと基本的に同じであるので、ここでは Sorensen の結果と、一部 Hohl の結果を示そう。

5. 孤立系の渦状腕

計算の初期条件として、角速度は一定とする(これは本質的な条件ではない)。密度分布は軸対称として、遠心力と重力が丁度釣り合うように密度をきめる。これでこの系は大きな波長のゆらぎに対しては安定化されている。

まず速度分散(円周運動に重なった乱雑な動き)を質点を持っていない系の場合を考えよう。このような系を冷たい円板とよんでいる。解析的な研究によると冷たい円板は、短い波長の密度ゆらぎに対して不安定であり、すぐに小さな固りに分裂してしまう事が知られている。数値計算でもこの事が立証された。計算開始後すぐに系は数多くのフィラメント状の部分に分裂する。それと同時に星の速度分散が0から急激に上昇する。速度分散は気体の温度に対応するから、速度分散の上昇を昇温とよんでよいであろう。速度分散の上昇にともなって、短い波長から安定化されていくので、小さなフィラメントは消滅していく。系の1回転時間の後には少数の大きな固りと、速度分散の大きい“熱い”フィールド・スターに分かれる。いわばコアとハローに分離する。最終的にはコアは1つになる。

上述したように、初期に速度分散を0とすると渦状腕を得どころか、系がひじょうに不安定であることがわかった。不安定さを除くには適当な大きさの速度分散を始めからつけ加えておく必要がある。あまり大きい速度分散をつけ加えると、円板は“熱すぎて”いかなるゆらぎに対しても安定になりすぎ、渦状腕すらできないことになる。そこで系を安定化する必要最小限の速度分散をつけ加えておく。

そのような初期条件から出発した数値計算例を図に示す。表紙の図2は星の個数密度が等しいような等密度線の時間的変化を示す。星の質量光度比がどこでも同じであると仮定すれば、この図はモデル銀河の等光度線と考えてよい。時間の単位は冷たい円板の1回転時間である。初期のほぼ軸対称な分布が急速にくずれて、渦状腕とおぼしきものになった後に最終的には棒状構造になる。それ以後は棒状構造が振動をくり返しながらい体回転する。棒状構造ができるという傾向は、初期の密度分布をガウス型とか指数関数型に変えても変らない。

図3(表紙のSのグラフ)には密度分布の時間的変化を示した。ここで密度は同心円上で平均したものをとる。初期の楕円的な分布が指数関数的分布に移行する。大部分の星は、もといた場所より中心の方へ移行し棒状構造

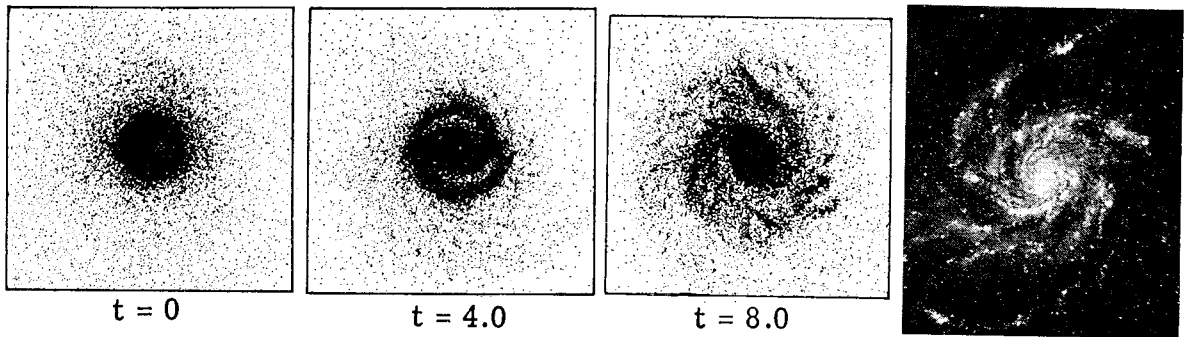


図5 冷却機構を考えた銀河の進化。Sc型をうまく説明した例。時間は左から右へ。
t=0, t=4, t=8. 右端の写真は M101.

を作り、残りの小数の星は外側へ出てハローになる。この質量移動によって得をする重力エネルギーが次に述べる昇温のエネルギー源になっていると思われる。最終的な密度分布が指数関数的になるという傾向も初期の密度分布によらず、共通したものである。指数関数的分布は実際の観測と一致する事も興味深い。

図4(表紙グラフのVR)に速度分散分布の時間的変化を示す。初期は楕円的分布であったのが、計算開始後すぐに外側の部分が昇温する。これは中心部にある“熱い”星が外側へ、いわば蒸発してきたものである。さらに時間が進むと今度は系全体が昇温する。この昇温は冷たい円板の場合ほど激しくはないが、無視できぬ大きさである。この昇温の原因は数値計算上のものではなく、物理的なものだと思う。フィールド・スターと密度波が相互作用することによる協同現象ではないかと推測している。以上をまとめると次のようになる。初期に適当な速度分散を持った軸対称の密度分布から出発すると渦状構造よりはむしろ棒状構造が得られる。最終の密度分布は初期によらず指数関数的になる。最終の速度分散はかなり大きく、観測よりも“熱い”星が得られる。

Hohl は渦状構造を得るため色々な工夫をしている。その一つは種族IIの星の存在である。今までの計算は円板状の星、つまり種族Iの星のみをとり扱ってきた。Hohl は種族IIの星の効果を、種族I星による自己重力場に外部中心重力場を加えるという形でとりいれた。その結果、キリキリ巻き込んだ渦状腕とかリング構造を得られた。しかしそれらの構造も6回転の後には昇温のため、うすれてしまった。実際、得られた速度分散は観測値を50~100%も上まわっている。

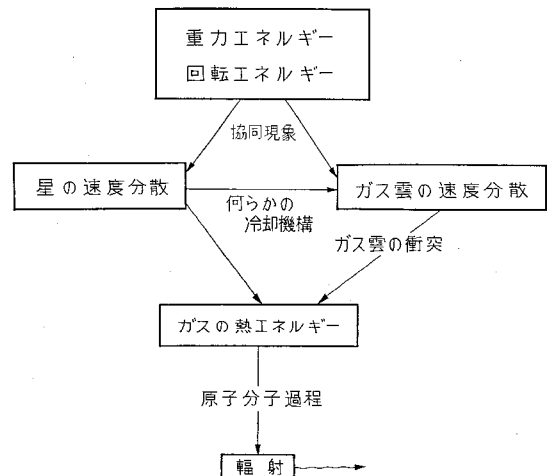
これらの結果を見ると昇温という現象が、渦状構造を得るためにはガンであることがわかる。その事は Miller たちの結果によっても示唆されている。Miller たちの計算では渦状構造はガス雲成分にあらわれたのであって、星成分はやはり異常に“熱い”。ガス雲は非弾性衝突をするとされているので、その時に余分の速度分散を失う。

つまりガス雲はつねに冷されているのである。協同現象でガス雲が得た熱を衝突効果で冷却してやれば、ガス雲の速度分散が適当になって渦状構造が得られる。

Hohl はそこで、ガス雲を考えるかわりに星成分だけでも適当な冷却機構を導入すれば渦状構造が得られることを示した。冷却機構として彼は星の速度分散を人工的に減小させる方法をとった。その結果、冷却率をうまく選んで図5のように見事なSc型の渦状構造を得ることに成功した。冷却率をあまり大きくすると、うまい結果は得られない。というのは星が冷たくなりすぎて、不安定になりさらに異常昇温をまねくからである。「腹を冷やしすぎると熱が出ますよ。」というわけだ。

6. 数値実験から得られる示唆

Sorensen も Hohl も星だけの系をとり扱っている。しかし現実の銀河はガスを含み、ガスが顕著な渦状構造を示すのである。しかしリンたちの考えが正しいとすれば、星も振幅が5%程度の渦状構造を示す。だからやはり星成分にも渦状構造を得たい。そのためには星の速度分散をガスに移行させる冷却機構が必要になる。ガス



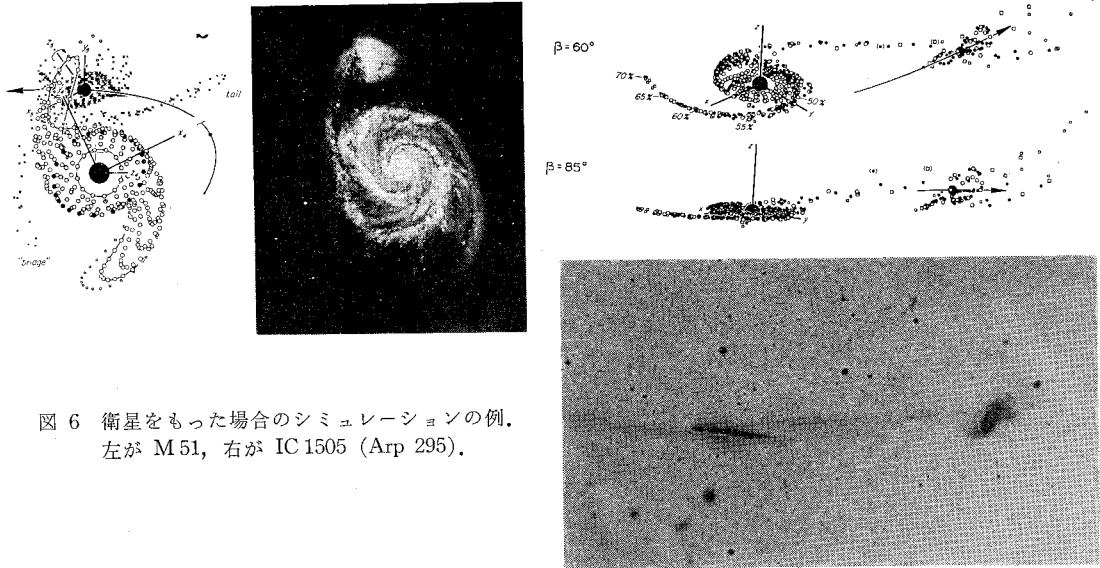


図 6 衛星をもった場合のシミュレーションの例。左が M51, 右が IC 1505 (Arp 295)。

は Miller たちも仮定したように容易に冷却されうる。そこで次のようなエネルギーの流れ図を提唱したい。冷却機構のところは星とガス(雲)との相互作用で、星の運動エネルギーをガス(雲)のエネルギーに変換する機構(例えば粘性)である。今後、星とガスを含んだモデルの研究を行うことを著者は計画している。

渦状構造を得る理論の中には、半径方向のガスの流れがあって、それと星とが二流体不安定を生じ渦状腕を作るという説もある。現実にはひょっとしたら、その方が正しいのかも知れないが、数値実験の結果から見れば、そのような細工は不必要のように思われる。渦状腕は、ガスを流さなくても出現するのである。

7. 相互作用する銀河

前述の計算法(b)について長々と述べたが、簡単に(c)にもふれておこう。

ある銀河の近傍を別の銀河が通りすぎるとどのような事がおこるか。潮汐力のため二本の腕ができるのである。このような機構で渦状銀河を説明できるのではないかという考えもあったが、そのような衝突の頻度は大きくないので渦状腕の説明には不十分である。しかし宇宙には相互作用している銀河の例がたくさんある。Voronstov-Velyaminov や Arp はそのような奇妙な形をした銀河の例を多く集めてカタログを作っている。二つの銀河の間に橋がかかっていたり、反対方向に尾がでている例が多い。彼らはその原因を重力以外のものに求めている。しかし最近の研究によると、奇妙な形の理由は銀河の重力的相互作用で説明できることが分ってきた。

Pfleiderer と Siedentopf は 1961, 1963 年にはじめて

そのような問題にとり組んだ。計算方法は次のようなものである。銀河を一つの質点とその周囲をケプラー運動する質量の無い多数の試験物体(衛星)で近似する。その銀河のそばを別の質点を通りすぎる時に、衛星の運動がみだされる。衛星の運動は二つの質点の重力によってのみ影響されるとする。つまり制限三体問題を数多く解くというわけだ。しかし彼らの研究は長い間忘れられていた。近年になって、彼らの研究は再び注目を集め、さらに進んだ計算が Yabushita や Eneev, Kozlov & Sunyaev, Toomre & Toomre によって行なわれた。特に後二者の計算はその膨大さといい、投稿日が近いことと言いつつ(1972年5月17日と19日)似ていておもしろい。

銀河平面内を別の質点が通過する例の外に、銀河面を下から上に通過したり、銀河面の上を通過したりする三次元的な例も計算している。いずれの場合も二本の渦状腕ができる。しかしこれらの渦状腕は銀河の回転時間のオーダーで消滅することは、自己重力を考慮していないから当然である。

Toomre たちは両方の銀河が衛星を持っている例を計算して、現実の奇妙な形の銀河をシミュレートできることを示した。それを図6に示す。

渦状腕にしろ奇妙な銀河にしろ、しばしばその原因は重力ではなく磁場だとか何だとか言われてきたが、憶測の域をこえて実際に数値実験をしてみると重力で十分なことがわかってきた。レーニンをもじって言えば「重力と言えども汲尽せない」のである。

最後に、ここで述べた問題について有益な討論を下さった京大工学部の桜井健郎教授と藪下信助教授に心から感謝します。