

コンピューター・シミュレーションが切り拓く天文学——星から宇宙の果てへ——(10)

銀河の形成と進化

吉岡 諭*・野口 正史**

銀河がどの様に誕生し、そしてどの様に進化していくかは、現代宇宙論の最大の問題の一つである。銀河形成と進化を数値計算でシミュレートする際には、しばしば星やダークマターといった粒子系だけでなくガスも含める必要がでてくる。このような2成分系のシミュレーションも最近行われる様になっている。ここではダークマター中の銀河形成と、銀河相互作用による銀河進化の大規模なシミュレーションを紹介する。

I. 銀河形成のシミュレーション

1. はじめに

夜空に輝く星ぼしは、暗黒星雲の中から生まれてくる。その形成の過程は、細かい点を除けばかなり良くわかってきたといえよう。さて、それでは恒星を何千億も含む銀河はどのようにして生まれてきたのだろうか。銀河の形成の問題は、現代の天体物理学にとって最大の課題の一つといえよう。銀河の形成は、それ自体だけで論ずることはできず、さらに大きなスケールの構造である宇宙の大構造(超銀河団やボイド)の形成と同時に論じなければならない。このような構造の形成については、様々なモデルが提出されている。それらのモデルのうちどれが正しいのか(あるいは全て間違っているのか)は今のところわからない。しかし、宇宙の極めて初期に生じた密度ゆらぎが重力によって成長し構造を形成したと考えるモデルが多い。密度ゆらぎの大きさ(振幅)が小さくちはその成長は線形理論によって解析的に予想できる。しかし、ゆらぎの振幅が大きくなってくるとその成長は解析的に追うことは困難になり、計算機でシミュレーションを行うこととなる。ここでは、銀河程度の質量を持った塊(密度ゆらぎ)が重力的に収縮して、銀河を作っていく過程をシミュレートした結果を紹介する。

2. 固定されたダークハローの重力場の中での原始銀河ガス雲の収縮

宇宙初期に発生した密度ゆらぎが重力的に成長する過程は、これまでは主にN体法を用いて調べられてきた。しかし、これらは重力相互作用だけをやる粒子を扱っているわけで、ダークハローの形成を追っているに過ぎず、星を形成していくガスの進化を追うものではなかった。実際の銀河の形成過程を調べるには、ガスの進化も同時に追わなければならない。そこで、ダークマターとガスからなる系の収縮による銀河の形成の3次元シミュレ-

ーションを特に回転の影響に注目して行った。

まず、固定されたダークハローの重力場の中での原始銀河ガス雲の収縮過程のシミュレーションを行った結果を紹介する。ダークハローを固定化するのは問題を単純化して物理的に理解しやすくするためのだが、ダークマターが先に収縮してハローを形成した後、ガスが落下してくるという状況を考えても良い。

原始銀河雲ははじめ宇宙の膨張とともに拡がって行くが、自分自身およびダークマターの重力のため膨張が止まり、収縮し始める。計算はその瞬間から始めることとする。そのときガス雲は一様密度で剛体回転をしているものとする。ガスは、冷却の効果を取り入れるために、常に等温とする。ダークハローはある半径でカットされた球対称な等温分布をしているものとし、ガスは自己重力の他、ダークハローからの重力も受けるとする。ダークハローの重力場は固定されているものとし、ガスからの重力による変形は考えない。計算には、SPH法とN体法を結び付けたコードを用いた。SPH法は一種のラグランジュ法で流体をそれぞれが拡がった分布を持つたくさんの粒子の重ね合わせで記述するもので、3次元の流体計算を比較的容易に行うことができる。

重力がガスの圧力を上回っているとき、ガス雲は収縮を始める。回転がない場合、収縮は等方的に起こる。しかし、回転がある場合、収縮が進むにつれて、回転軸に垂直な方向への収縮は遠心力のために止まる。一方、回転軸方向への収縮は続くから、ガス雲は平べったいディスク状になる。ダークハローが存在していない場合、回転するガス雲は、その温度が低く、初期の回転速度が小さいとき、ディスク状に収縮した後分裂することがわかっている。計算の結果、ダークハローの存在が、ガスの温度と初期の回転速度に関するパラメータ空間の中でガスが安定な平衡状態に落ちつく領域を拡げることがわかった(図1参照)。しかし、ガスがダークハローのない場合に分裂するようなパラメータに対しては、ダークハローの存在がガスの安定化にはあまり効かず、ディスク状収縮したガスは重力不安定性によって分裂することがわ

* 東京商船大 Satoshi Yoshioka, ** ウェールズ大 Masafumi Noguchi: The Simulations on the Formation and Evolution of Galaxies.

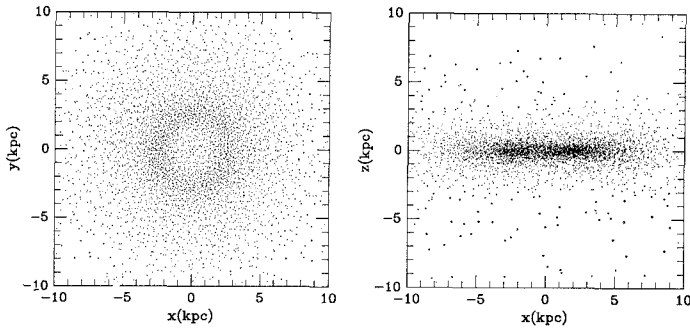
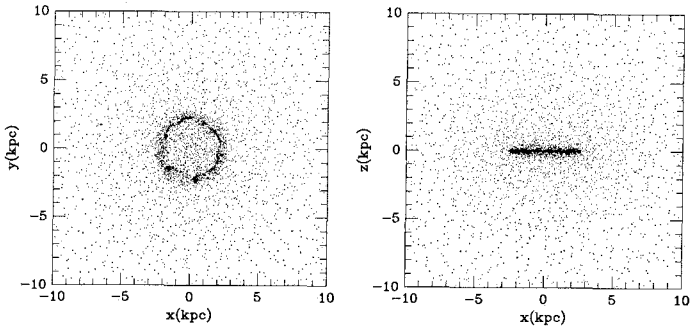
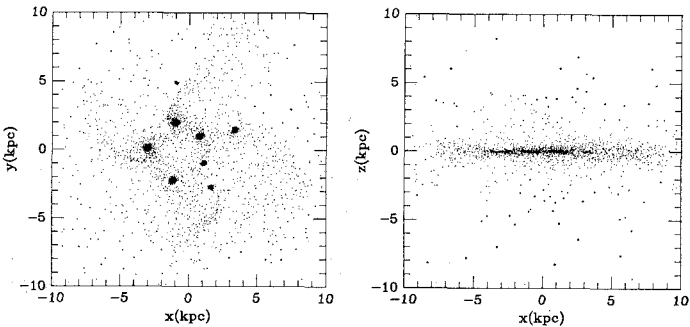


図 1 固定されたダークハローの重力場の中の原始銀河ガス雲の収縮: ガスの温度が高く, 回転が早い場合. 重力収縮した後のガス雲を回転軸に平行および垂直な方向から見た様子. ガス雲はダークハローからの重力を受けて安定なディスク状の平衡状態に落ち着く.



(a)

図 2 固定されたダークハローの重力場の中の原始銀河ガス雲の収縮: ガスの温度が低く, 回転が遅い場合. ガス雲を回転軸に平行および垂直な方向から見た様子. はじめガス雲はリング状に収縮するが (a), その後主に自分自身の重力の不安定性により分裂する (b).



(b)

かった(図 2 参照).

3. ダークマターとガスから構成されている密度ゆらぎの進化

次に, 密度ゆらぎがダークマターとガスから構成されておりそれぞれが自分自身および他の成分からの重力を受けて運動するという 2. に比べてより現実的な場合を計算した結果を紹介する. 計算は, 先ほどと同じように, 密度ゆらぎが動径方向には運動をしていない状態から始める. 初期の密度ゆらぎは, 密度が一様で, 剛体回転をしているものと仮定する. また, ガスは常に等温だとする. 一方, ダークマターははじめポアソン分布で, 一定の速度分散を持っているものとする.

ガスの温度が低く, ダークマターの速度分散が小さい場合, ダークマターは, 激しい収縮と緩和現象を起こし, コア-ハロー構造を形成する. 一方, ガスは平べったい形状に収縮するが, すぐに分裂する. ガスの温度が高

く, ダークマターが大きな速度分散を持っている場合, ダークマターの収縮は弱く, ほぼ球状な形状をとる. 一方, ガスは安定なディスクを形成し分裂は起こさない.

また, 角運動量は, 分裂が起こった場合, ガスからダークマターに輸送されるが, 分裂が起こらない場合, 輸送はほとんど起こらないことがわかった.

4. おわりに

銀河形成の 3 次元シミュレーションでガスをきちんと流体として解こうとする試みは, まだ始まったばかりといえる. 銀河が形成されていく過程を, 冷却過程, 星形成などいろいろな物理過程を含めて計算機で解くことは, 現在のスーパーコンピュータの能力をもってしても困難である. しかしそれも今後のスーパーコンピュータの能力の向上によって可能となってくるであろう. また, 観測的にも, 最近原始銀河の候補といっても良いような天体が見つかってきている. 今後の観測および理

論計算の進歩によって銀河形成の謎も解けていくことであらう。(吉岡 諭)

II. 銀河の進化

1. はじめに

銀河の理論的研究において、コンピュータによる数値シミュレーションがいかに威力があるかを示す良い例は、1970年代初期の「バー不安定性」の発見であろう。銀河のディスクを円運動している多数の粒子でモデル化し、その振舞を調べてみると、強い外場を支えられていない限り、ディスクは数回転する間に棒状(バー)に変形してしまうのである。現実の銀河の半数以上はバーを持

っていない。このことから多くの(渦状)銀河には、ディスク以外に、光では見えないが強い重力場を供給できるような成分が存在しなければならないという結論が出てくる。このシミュレーションは、中性水素ガスによる回転曲線の電波観測と共に、銀河における大質量ハロー(ダーク・ハロー)の存在を明確な形で示したのである。

2. 活動的銀河像

現在、銀河の研究は、潮汐相互作用や合体(マージャー)に代表されるような、進化のより動的な側面に向かいつつある。そこには多くの未解決の問題が残されている。

たとえば、キューサーは若い銀河の中心核活動であると考えられているが、最近の観測によれば、そのトリガ

262

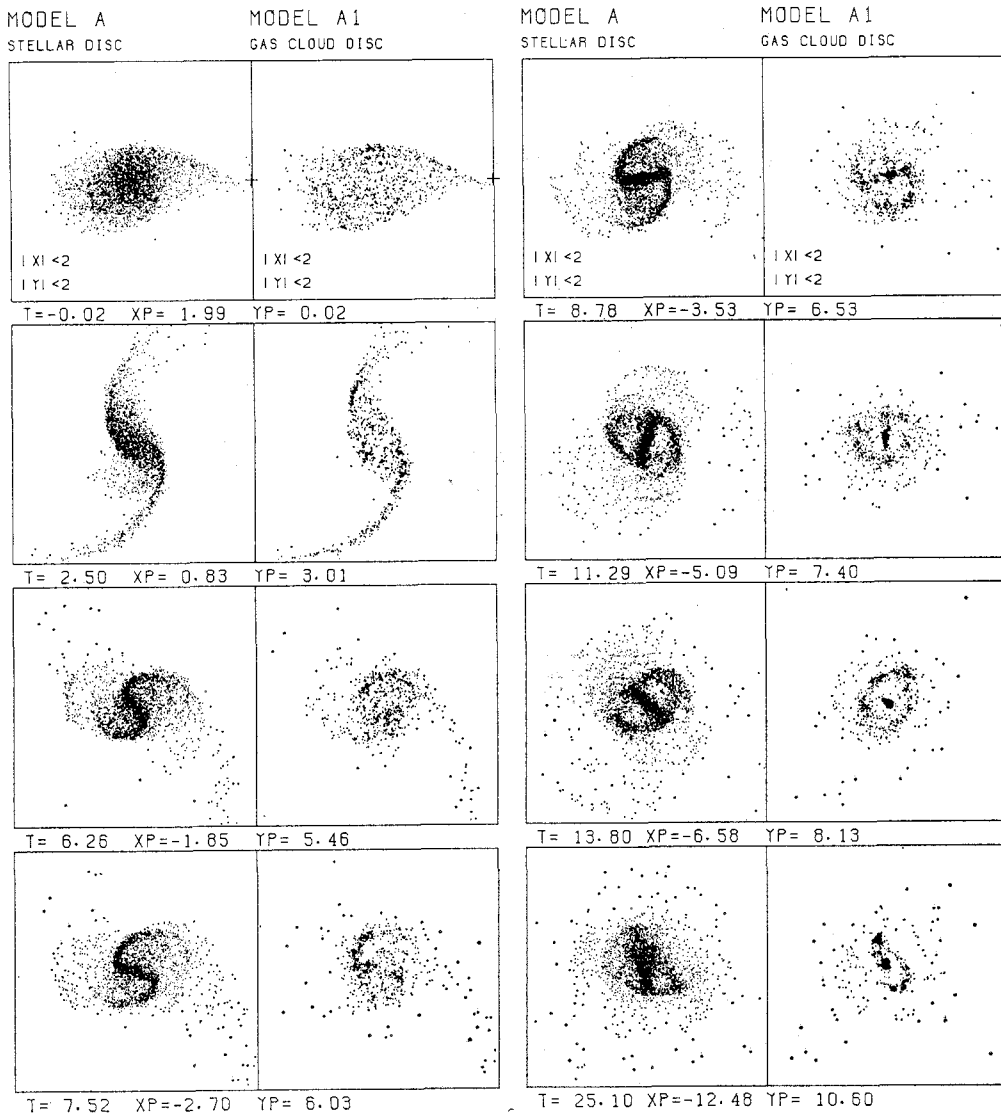


図1 相互作用銀河の形態変化。各図の左は星の分布を、右はガスの分布を示す。潮汐力によってつくられたバーの作用で、ガスが銀河中心部に流入している。

一は、他の銀河との潮汐相互作用らしい。ミニ・クェーサーともいえるセイファート銀河や中心核付近で激しい星形成が起こっているスターバースト銀河も相互作用銀河で発生率が高い。相手銀河の潮汐力は、銀河中心には作用しないことを考えると、具体的にどのようなメカニズムによって中心核活動が励起されるのかは、非常に興味深い問題である。また、一部の人が主張するように楕円銀河は本当に渦状銀河同志のマージャーによって形成されたのだろうか。最近の赤外線観測によれば、マージャー銀河では活発な星形成活動、つまりガスの急速な消費が起こっている。楕円銀河的な天体が形成されることはありそうである。しかしこの問題に明確な回答を与えるためには、マージャー銀河におけるガスの振舞を詳しく知る必要がある。

これらの問題を取り扱うのに解析的手法は、いささか力不足である。というのは、銀河相互作用やマージャーでは「形態」が重要な役割を果たすからである。我々は、球対称や軸対称から大きくはずれしかも時間的に激しく変化する形態を扱わねばならない。形態、いかにすれば重力場の変化は、ガスの運動や星形成に大きな影響を与えるだろう。形態の描写は解析的手法の最も苦手とする所であり、それゆえ、数値的手法が必要とされるのである。中でも、恒星系やガス系を多数の粒子の集団として取り扱うN体シミュレーションは、その柔軟性ゆえに、今後も有力な武器であり続けるだろう。

筆者は、銀河の相互作用と中心核活動の関連に早くから注目し、数値(N体)シミュレーションによる研究を行ってきた。その結果、潮汐力は銀河の恒星系ディスクに棒状構造(バー)をつくりだし、そのバーの作用によってガスが銀河中心に流れ込み、そこでスターバースト

などの活動性を発生させうることがわかった。またバーの形成において、銀河ディスクの自己重力が本質的な役割を果たしていることも明らかとなった。筆者の研究で得られたもう1つの重要な結論は、相互作用は決して一過性の現象ではなく、銀河に永続的な「刻印」をも与えるということである。激しい相互作用を経験した渦状銀河は、ディスク内の恒星の運動が大きく乱されるためにもはや渦状腕を維持できなくなる。つまりディスクがホットな状態になるため渦状腕は「溶解」してしまうのである。それと共に大部分のガスは銀河中心に落下してしまう。このような銀河は、最終的に、ガスを豊富に含む活動的中心核の周囲にのっぺりとした恒星系ディスクを持つ奇妙な天体になってしまうと予想されるのである。このような状態は何十億年も続くと言われるので、その間に相手銀河は遠くへ離れてしまい、銀河は相互作用しているようには見えないであろう。我々は「孤立」銀河をもう一度見直す必要があるであろう。

3. 将来

数値シミュレーションによる銀河の理論的研究は今後世界的規模でますます盛んになるであろう。そして最終的には「銀河マシン」とでもいえるシミュレーション・コードの構築をめざすと思われる。そこには星形成や超新星爆発といった恒星とガス間の物質循環過程や分子雲の成長など、銀河進化のマイクロプロセスがすべてとり入れられている。我々は様々な条件のもとで銀河がどのように進化していくかを実験できるようになるのである。そこには真の意味での発見が期待できる。コンピュータの中の「銀河」は、本物には及ばないだろうが、やはり人間の想像力を超えているかもしれないからだ。

(野口正史)

日本学術会議だより №.18 より抜粋

第15期日本学術会議会員の選出について

日本学術会議では、現在、第15期会員(任期:平成3年7月22日から3年間)を選出するための手続きが進められている。

先般、最初の手続きとして、6月末日を締切期限に、各学術研究団体からの登録申請の受付が行われた。今回申請のあった団体数は、942団体であった。

今後引き続き行われる手続きとその日程の概略は次のとおりである。

《平成2年》

- ・ 9月上旬……………登録審査結果の通知
- ・ " ………………関連研究連絡委員会(注)についての意見聴取
- ・ 11月30日まで……………関連研究連絡委員会の指定
- ・ 12月上旬……………会員の候補者の選定及び推薦人の指名の依頼

《平成3年》

- ・ 1月31日まで……………会員の候補者の届出の締切り
- ・ 2月20日まで……………推薦人(予備者を含む)の届出の締切り
- ・ 3月20日まで……………会員の候補者の資格の認定等の通知
- ・ 3月下旬……………推薦人に会議開催等の通知発送
- ・ 4月20日まで……………候補者関係異議の申出に対する決定
- ・ 5月中旬から
6月上旬まで……………推薦人会議(会員及び補欠の会員として推薦すべき者を決定)
- ・ 6月中旬……………日本学術会議を経由して内閣総理大臣へ推薦
- ・ 7月22日……………第15期日本学術会議会員の任命