

銀河の化学力学進化の数値シミュレーション

中 里 直 人

〈学振特別研究員／東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: nakasato@astron.s.u-tokyo.ac.jp

銀河がどう形成されどう進化してきたかを調べるための手段として有用な、数値シミュレーションによる手法について解説します。そのようなシミュレーションの手法をつかって、我々の銀河である天の川銀河の形成過程について、どのようなことがわかるのかを具体的に説明します。

1. ふたつの問い

銀河はどのようにできてきたのだろうか（銀河の形成）、そして、どのように進化してきたのだろうか（銀河の進化）。このふたつの問いは、古くから天体物理学者を悩ませつづけ、現在においても完全には解明されていません。多数の恒星からなる銀河や球状星団は、恒星系と呼ばれ、その形成や進化には、宇宙の大規模構造を作り出す重力から、原子同士の化学反応までのたくさんの物理過程が関わっています。そのため、恒星系の形成進化を調べるためには、関係する物理過程をできるだけ正確に考慮する必要があります。このふたつの問いの完全解決を難しくしています。この記事では、これらの問いへのひとつのアプローチ方法である、数値シミュレーションによる研究について解説します。銀河の数値シミュレーションといっても、様々な方法論があり、全てを説明することはできないので、この記事では、筆者がおこなった数値シミュレーションによる、天の川銀河（以下、銀河系）の形成進化モデルに重点をおいて説明します。

恒星系の中でも、銀河系の形成や進化を理解することには特別な意味があります。それは、銀河系が恒星系の形成進化に関係する様々な物理現象を詳細に観測することができるほとんど唯一の天体だからです。具体的には、恒星系を構成する星が形成している領域を赤外線や電波で直接観測可能

であること¹⁾や、銀河系では個々の星の固有運動が観測可能なので銀河系の力学的構造が直接調べられること²⁾や、個々の星の重元素量³⁾や星の年齢⁴⁾の精密に推定可能であること等です。したがって、銀河系の理論的なモデルを作り、それを様々な観測事実と比較検討していくこと⁵⁾が、恒星系の形成進化を明らかにするうえで必要になるのです。

2. 銀河の形成と進化とは？

宇宙初期、恒星がまだ形成される以前には、宇宙には恒星のもととなるガス雲と暗黒物質だけがありました。現在では、宇宙の質量の大部分は暗黒物質からなっていると考えられており、ガス雲は暗黒物質の重力にとらわれて収縮していきます。あるガス雲は収縮し高密度になり、恒星が形成されます（星形成）。この時こそが銀河形成の第一歩です。後に銀河となる大きなガス雲内では、いたるところで星形成がおこり続けます。恒星は各々で成長し、明るさや温度が変化していきます。やがて恒星は老化をはじめます。このような恒星の成長から老化への速度（寿命）は、恒星の質量に依存しており、重い恒星ほど進化の速度が速く、重い恒星が「死」に至るまではあっという間です。恒星の「死」は、超新星爆発とよばれ、その名のとおり恒星は爆発を起こし、まわりに重元素がふんだんに含まれた恒星の残骸をばら撒きます。恒星の残骸はあたりに残っているガス雲とまざり、重元

宇宙における化学進化のくりかえし

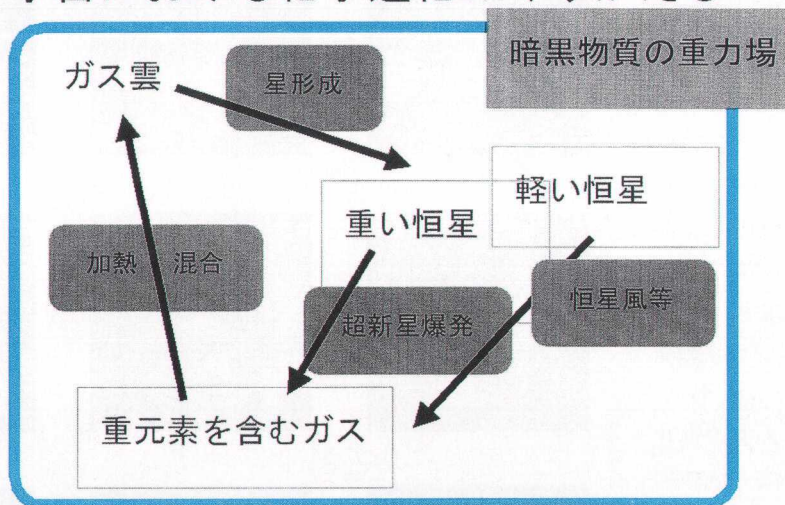


図1：宇宙における化学進化のくりかえし

素を含んだガス雲は再び収縮し次の世代の恒星が形成されていきます。

このような、ガス雲の収縮、星形成、超新星爆発のくりかえし（図1）によって、銀河のもととなるガス雲に含まれる重元素の量は、時がたつにつれて増えていきます。銀河全体の重元素量が以上のようなくりかえしで変化していくことを「銀河の化学進化」と呼びます。一方で、ガス雲自身が収縮したり、暗黒物質の重力場の中を動きまわるガス雲同士が衝突したり、形成された恒星は他の星や暗黒物質の重力場の影響のもとで運動しています。このような、運動をとともなう銀河の構造の変化を「銀河の力学進化」と呼びます。銀河の形成と進化を数値シミュレーションによって研究する際には、銀河の「化学的な進化」と「力学的な進化」とを記述する方程式を、できるだけ現実的に解いていくことになります。

3. 銀河系の形成仮説

過去において、銀河系形成の仮説として以下に説明するふたつの説が提唱されていました。ひとつ

は、Eggen ら⁶⁾による、“Free Fall Collapse” 説（自由落下収縮説）で、銀河系は単一のガス雲が宇宙年齢と比べて非常に短い時間で重力により収縮して、一度に星形成をおこして、銀河系が形成されたとする説です。もうひとつの説は、Searle と Zinn⁷⁾による、“Slow Collapse” 説（ゆっくりとした収縮説）で、これは銀河系は単一のガス雲から形成されたのではなく、複数の小さなガス雲や恒星系が比較的ゆっくりと集まって形成されたとする説です。現在では、これらの二つの説は古典的なものと考えられており、銀河系は“Cold Dark Matter” (CDM) による構造形成で形成されたと考えられています。この仮説においては、宇宙初期にはまず銀河より小さな構造が“Free Fall Collapse” 説のように形成され、銀河程度の大きな構造は、“Slow Collapse” 説のように小さな構造の合体によって徐々に形成されたと考えられています。よって、CDM 仮説のもとでは、銀河系の形成は、ふたつの古典的な説を組み合わせたものであったと考えることができます。

銀河の形成過程の理論的な研究は、70年代に行

なわれていた解析および準解析的な研究をもとにして、80年代後半以降、数値シミュレーションによる研究が盛んにおこなわれるようになりました。このような数値シミュレーションによる研究の進展には、80年代以降の計算機スピードの劇的な進歩と、数値シミュレーション手法の発展が寄与しています。特に、3次元的なガス雲の進化を計算する手法（流体力学方程式の解法）である、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法⁸⁾は、CDM 説のもとでの構造形成のように、球対称などの仮定によって計算を簡単にできない場合の研究の発展に、大きく寄与してきました。Katz ら⁹⁾は、SPH 法を応用することで、CDM 説にもとづいて、ガス雲が収縮して恒星を形成するという銀河の力学進化を記述する方程式を解きました。結果、銀河系のような円盤銀河を再現することができました。それ以降、多くの研究者が Katz らと同様の手法によって銀河の形成進化モデルを構築することをおこなってきました¹⁰⁾。

4. 銀河系の数値シミュレーション

銀河系を構成する恒星は、銀河中心に存在する球状のバルジ星、銀河の回転面に集中しているディスク星、ディスク面から離れて広がって分布し

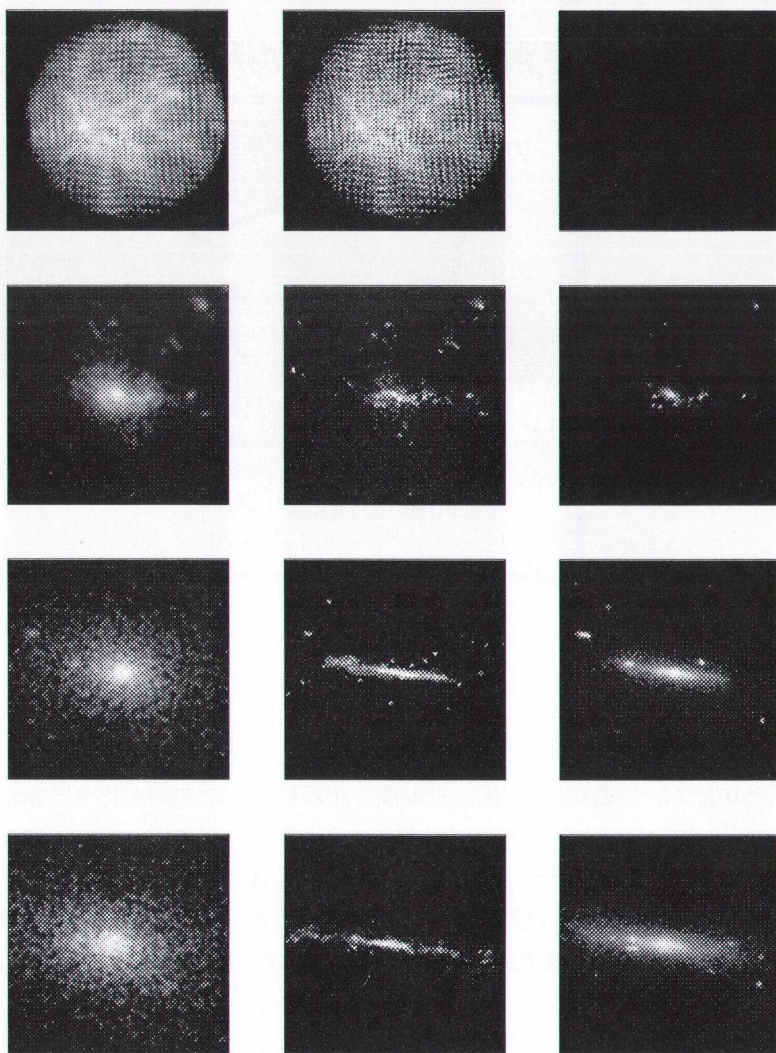


図2：銀河系の数値シミュレーションにより得られた各粒子の密度分布。上から初期状態、計算開始より5億年、20億年、30億年の暗黒物質粒子（左）、ガス粒子（中央）、星粒子（右）の密度分布をあらわしています。各年代によって図のスケールは異なります。上から、正方形の1辺が120 kpc、80 kpc、40 kpc、30 kpcと拡大して図示しています。銀河系の半径は約10 kpcと考えられています。

ているハロー星の3種類に分類できます。それぞれの恒星集団は、力学的な性質が異なるばかりでなく、恒星がもつ重元素量に特徴があります。これらの力学的・化学的に異なる恒星の集団の性質を調べるためには、化学進化を考慮した3次元の理論モデルが必要となります。私はKatzらと同様の手法を使って、銀河系の詳細な3次元モデルを、

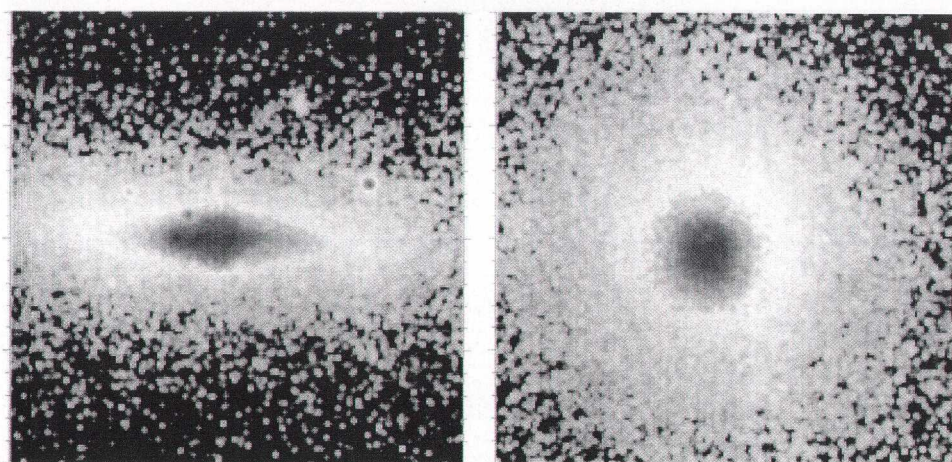


図3：計算開始から50億年後の星粒子の密度分布の拡大図。左の図が円盤を真横から見た図で、右の図は円盤を真上から見た図です。図のスケールは15 kpcです。

数値シミュレーションによって構築しました。

現在の宇宙論モデルでは、宇宙初期には、宇宙全体の密度構造はほとんど一様であったと考えられています。「ほとんど一様」という断り書きは、完全に一様であったのではなくて、局所的には密度に小さな山や谷（密度の揺らぎ）があったと考えられているからです。この小さな山のあるところは、まわりより密度が大きいので、まわりの物質（暗黒物質とガス）をひきよせて、さらに密度が大きくなっていきます。このような山の領域が、重力的に収縮して現在の銀河が形成されたと考えられています。

今回紹介するモデルは、この銀河のもととなった「山の領域」を切り出して、その領域の進化を記述する方程式を数値的に解くことで得られたものです。具体的には、暗黒物質とガスを仮想的な粒子でおきかえて、粒子同士の重力相互作用を記述する方程式と、ガス粒子に関してはSPH法の方程式を同時に解くことで力学的進化を追うことができます。化学的な進化のほうは、ガス粒子が重力的に収縮して適切な条件を満たした時に、ガス粒子から「星粒子」をつくりだすことで解いてい

きます。ガス粒子から作られた形成された星粒子は、超新星モデルにもとづいた頻度で、超新星爆発を起こし、重元素を含んだガスを近くのガス粒子にもどします。ガス粒子から星粒子ができて星粒子がガス粒子に重元素を含んだガスをもどす、という数値計算上のサイクルは、現実の星形成と超新星爆発のサイクルを、まさに「シミュレート」（真似）していることになります。以上のような数値シミュレーションのプログラムに、CDM仮説にもとづいて予測されるような密度揺らぎをもった、暗黒物質とガス粒子の初期の位置を与えることで、ひとつのモデルが計算できます。

今回紹介する銀河系のモデルでは、複数のモデルを計算をした上で、一番銀河系に近い結果が得られたモデルを選んで、その結果を紹介します。このモデルの質量は全体で 10^{12} 太陽質量で、そのうち1割がガスであったと仮定しています。さらに、全体が適当な速度でHubble膨張（宇宙膨張に相当する）及び剛体回転している（角運動量を与えるため）ことを仮定しています。図2に、このモデルの初期の進化の様子をしめします。左のパネルは暗黒物質粒子の進化の様子、中央のパネルはガス

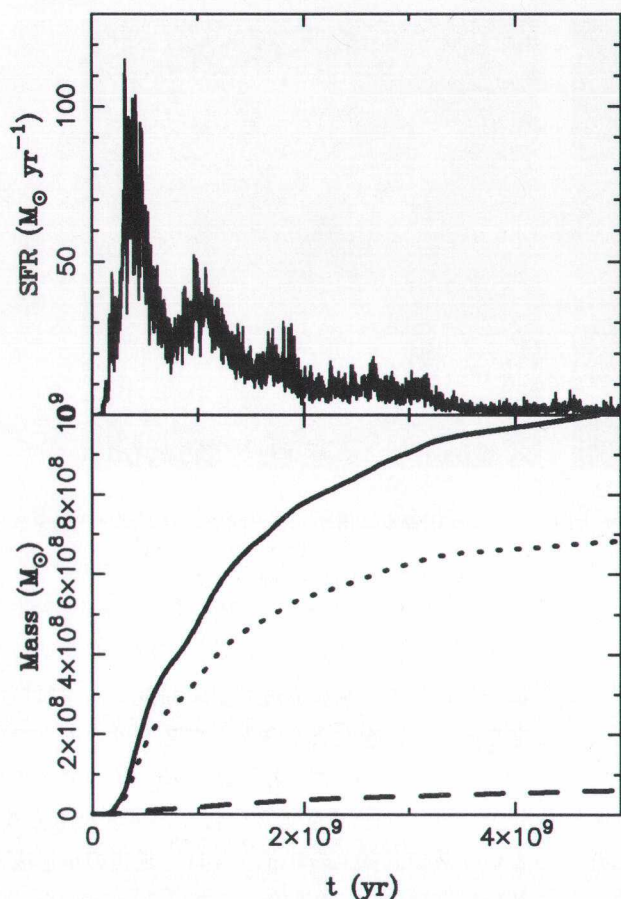


図4：シミュレーションにより得られた、星形成率の進化と銀河系内の重元素量の進化。上のグラフは、星形成率（1年に生まれた星の質量）を太陽質量を単位としてしめしています。銀河系の観測されている星形成率は、1年あたり数太陽質量です。下のグラフは、重元素の量を太陽質量を単位としてしめしています。下の図における実線は全重元素量、点線が鉄の質量、破線が酸素の質量の進化をしめしています。

粒子、右のパネルは星粒子をあらわしています。一番上の図が粒子の初期状態で、暗黒物質粒子とガス粒子はほぼ一様に分布しており、星粒子はありません。初期状態の図では、暗黒物質粒子、ガス粒子ともに密度揺らぎを見てとることができます。以下の図は、計算開始から5億年、20億年、30億年の各粒子の密度を表しています。進化の初期段階では、暗黒物質粒子とガス粒子が、初期の密度

揺らぎに応じて小さな塊として収縮しています。星粒子の図を見ると、個々の塊のところで新しい星が形成されていることがわかります。暗黒物質粒子の進化を見ると、多数の小さな塊どうしが衝突合体を繰り返して、ひとつの大きな塊が徐々にできていきます。一方でガス粒子は、途中から暗黒物質粒子とは違った進化をしていきます。これは、暗黒物質粒子とガス粒子が異なる性質を持つためです。つまり、ガスの塊同士が衝突合体すると、ガスの性質（散逸と放射冷却）によって、運動エネルギーが失われてしまうためです。このモデルでは初期に、図2の縦軸の周りに回転を与えているので、ガス粒子は暗黒物質の重力場にひかれ縦方向により多く収縮します。ガス粒子が縦方向に収縮した時に、ガスの性質のためその方向の運動エネルギーが失われ、20億年の図にあるように、ガス粒子は円盤のような形状になります。ガス粒子の円盤ができた以降、新しい星粒子は主に円盤内で形成されることになります。図3に、計算開始から50億年に対応する星粒子の密度分布を示します。中心部にほぼ球状のバルジ星があり、ディスク状に星が分布しており、円盤銀河である銀河系とよく似た形状になっていることがよくわかります。以後、ガス雲同士が衝突するなどの派手な現象はおこらずに、徐々に円盤内での化学進化が進んでいくことになります。図4に星

形成率の進化と、銀河系内の重元素量の進化の様子を示します。星形成率が一番高くなっている時は、ガス雲同士が銀河中心で合体している時に対応します（図2の5億年の図参照）。この時にほとんどのバルジ星が形成されます。その合体以後の星形成率は、徐々に低くなりほぼ一定値になり、このときの星形成はほとんどが円盤内でおこっています。

結果、ハロー星、バルジ星、ディスク星がどのように形成されたのかについて、以下のようなことがわかりました。

- (1) 銀河系形成初期に、密度の高い小さな密度揺らぎから最初のいくつかの恒星が誕生した。この時期に形成された恒星は全て後にハロー星となった。
- (2) 小さな密度揺らぎは衝突合体を繰り返し、最終的に銀河中心となるとところで合体し、激しい星形成がおきた。この時に形成される恒星がバルジ星となった。
- (3) バルジ星の形成時には、多くの星が短時間で形成されるので、バルジ星の重元素量の分布関数は、広がった分布を示すようになった。
- (4) 外側に広がっていた密度の低いガスは、角運動量を保存しながら回転軸の方向に収縮し、ガス・ディスクを形成した。ガス・ディスク内では、重力不安定性により、局所的に密度が上昇し星形成が間歇的におこった。このような星はディスク星となった。

以上のように、ハロー星、バルジ星、ディスク星がどのように形成されたのかということは、Katzらのモデルにはじまり私のモデルを含めた、多くの研究者たちの3次元の化学力学進化モデルによってよりはっきりと説明されることになりました。

5. 答えは？

この記事では、筆者がおこなった数値シミュレーションによる、銀河系の化学力学進化モデルの構築について解説しました。さて、私のモデルによって「銀河の形成と進化」に関する問いに答えられたのでしょうか。答えは残念ながら否です。この記事では「銀河系のモデル」についてのみ紹介しましたが、実はそれすらも完全に成功しているとはいえません。いくつかの観測事実はよく説明できましたが、まだ説明できていないこともいくつかあ

ります。しかも、宇宙には銀河系以外にもたくさん銀河があって、それらの形成と進化についても説明を要することは数多くあります。この記事で紹介したような数値シミュレーションプログラムを作成することは、「ふたつの問い」と闘うための武器をいちから作りだしていくことにはかなりません。研究者達はこれからも自分の武器を磨きつつ、それを巧く使う方法を探していかなければならないのです。

参考文献

- 1) Olofsson G., et al., 1999, A&A, 350, 883 等
- 2) ESA. 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues (ESA SP-1200) (Noordwijk)等
- 3) Boesgaard A.M., et al. 1999, AJ, 117, 1549 等
- 4) Pont E., Mayor M., VandenBerg D.A., 1998, A&A, 329, 87 等
- 5) Nakasato N., Nomoto K., ApJ, submitted
- 6) Eggen O.J., Lynden-Bell. D., Sandage A.R., 1962, ApJ, 136, 748
- 7) Searle L., Zinn R., 1978, ApJ, 225, 357
- 8) Lucy L., 1977, AJ, 82, 1013 及び Gingold A., Monaghan J., 1977, MNRAS, 181, 374
- 9) Katz N., 1992, ApJ, 391, 502
- 10) Steinmetz M., Müller E., 1994, A & A, 281, 97 等

Numerical Simulation of Dynamical and Chemical Evolution of the Galaxy

NAKASATO, Naohito

Department of Astronomy, University of Tokyo/
Astronomisches Rechen-Institut, Heidelberg, Germany

Abstract: In this article, we will describe our numerical method for investigating how galaxies form and evolve. With our three-dimensional dynamical and chemical numerical method, we can study and explain the formation and evolution process of our Galaxy.