

# 銀河進化を化学力学的に解明する

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

&gt;

小 林 千 晶

〈ポストドク研究員・マックスプランク研究所 宇宙物理部門 〒  
e-mail: chiaki@MPA-Garching.MPG.DE

&gt;

大型観測機器による観測結果の増大と高精度化の時代に、銀河進化を明らかにするためには、銀河内物質の化学進化と星や暗黒物質の力学進化を同時に考慮したシミュレーションモデルが必要です。それを実現してきた我々の GRAPE を活用した粒子法による銀河進化モデルの、これまでとこれからについて概説します。

## 1. はじめに

「一を聞いて十を知る」とは、賢い人のたとえのことですが、天文学者が日々してるのは、まさに「一」という観測機器による事実を「聞いて」、「十」という天体の起源や進化を理解することです。このような従来の科学の手法とは異なる、いわば「百聞は一見にしかず」な研究手法が、ここ 20 年ほどで大きく進歩した数値計算による研究です。我々は、コンピューターシミュレーションにより、銀河の形成進化を理解しようとしています<sup>1)</sup>。本稿では、専用計算機 GRAPE<sup>2)</sup>を利用した銀河進化モデルのこれまでの現状、および、銀河分野での数値計算の将来展望について述べます。

## 2. The model から Models の時代へ

数値計算による銀河進化の研究は、90 年代以降の計算機の進歩によって大きく発展しました。この分野の日本における発展には、GRAPE (GRAvity piPE) の存在が大きく寄与してきました。本来 GRAPE は球状星団の進化を研究するために設計作成された、多体問題専用計算機でした<sup>3)</sup>。球状星

団は、多数の星のみからなる天体で、その研究のひとつの手法に、個々の恒星を質点として扱い、質点間の相互作用を計算する手法がありました。GRAPE は、質点間の相互作用計算に特化することで、汎用の計算機をはるかに凌ぐ計算速度を得ることができました。銀河は、星とガスと暗黒物質からなる、星団より複雑な系ですが、それぞれの要素を質点としてモデル化することが可能です<sup>4)</sup>。つまり、GRAPE の恩恵にあずかることができるのです。ガスを粒子として扱い、GRAPE を利用することで高速化するという手法は、日本のグループによってはじめられました<sup>5)</sup>。GRAPE は年々高速化が続くとともに、世界の様々な研究機関で星団進化の研究用として利用が広がり、やがて GRAPE を活用した粒子法による銀河進化モデルが Steinmetz らによって発表されました<sup>6)</sup>。それまでの粒子法による銀河モデルの計算には、大型計算機の利用が必要でした。彼らは、GRAPE を活用することで、小さい研究室が所有するような計算機でも、粒子法による銀河進化の研究が可能なことをしめたのです。

そのころ、筆者らが所属していた研究室で、

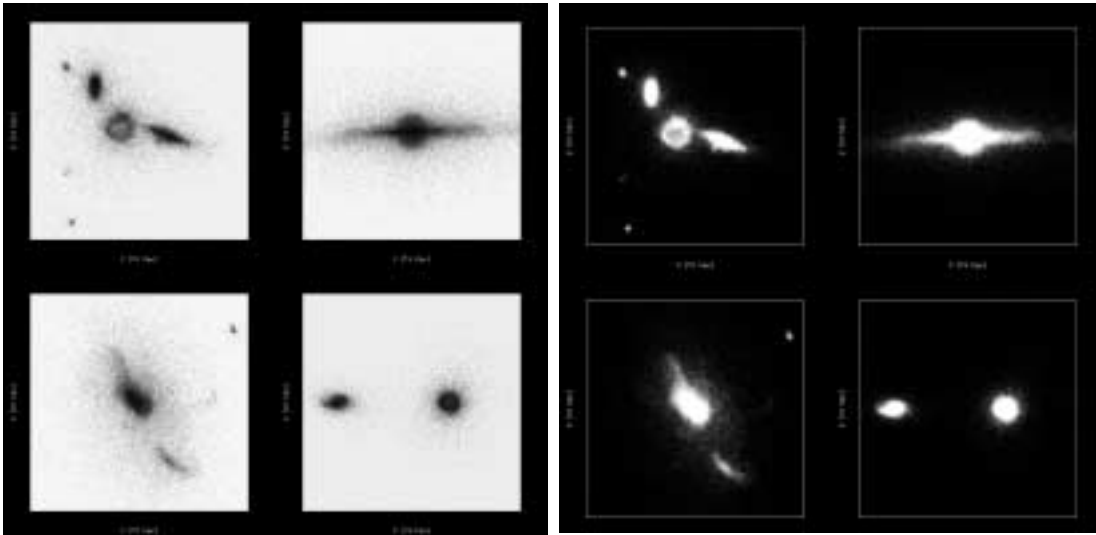


図1：異なる密度ゆらぎによって形成される様々な形態の銀河の例

GRAPE を活用した銀河モデルの構築が開始されました（これは、偶然、筆者の一人が大学院に入学した時期と重なります）。結果、銀河の中でも比較的質量の小さな矮小銀河の見事な形成モデルが発表されました<sup>7)</sup>。このモデルでは、形成初期に中心部でおきた星形成が原因で、ガスが球殻上の構造を形成して、そこでさらなる星形成が続くという現象が発見され、これは粒子法によるモデルならではの結果でした。GRAPE を活用した銀河モデルは筆者らによってさらに発展し、前回の記事<sup>1)</sup>で解説したとおり、化学力学シミュレーションによって、天の川銀河の形成過程を再現することで、その中心部にあるバルジ星の形成過程があきらかになりました<sup>8)</sup>。この結果によって、バルジ星は、どうやら形成過程の異なるふたつの集団からなることが新たに明らかになりました。ふたつの集団とは、銀河形成初期に短時間で形成された集団と、その後に銀河ディスクの内側で徐々に形成された集団です。なぜこのようなことがわかったのかというと、シミュレーションでは、星が「いつどこで誕生したのか」がすべて記録されているからです。モデル銀河のバルジ星を調べることで、すぐにふたつの集団がある

ことが判明するのです。

2000 年を迎えて、国立天文台の天文学データ解析計算センターには、最新の GRAPE が大量に導入され、共同利用が開始されました。これにより、日本では、球状星団、銀河進化、惑星形成等の分野で、粒子法計算による研究がさらに発展をはじめました。筆者らにとっては、大量の GRAPE と高速な計算機の組み合わせによって、計算時間がさらに短縮され、結果として、複数モデルの比較検討という新しい可能性が生まれました。銀河は密度ゆらぎが重力によって成長する（高密度になる）ことで形成されたと考えられています。我々の銀河モデルはすべて、宇宙論によって予言される密度ゆらぎ（CDM ゆらぎ）を初期条件として、暗黒物質とガスの進化を粒子法によって計算することで得られたものです。初期の密度ゆらぎが異なれば、結果として形成されるモデル銀河の様子は異なるものになります。図1はそのような結果の例です。この図にあるように、現実の銀河も様々な形態（円盤銀河や楕円銀河）をしています。これらのモデル銀河では、全ての星の情報が保存されているので、銀河形態の起源に迫ることが可能になるで

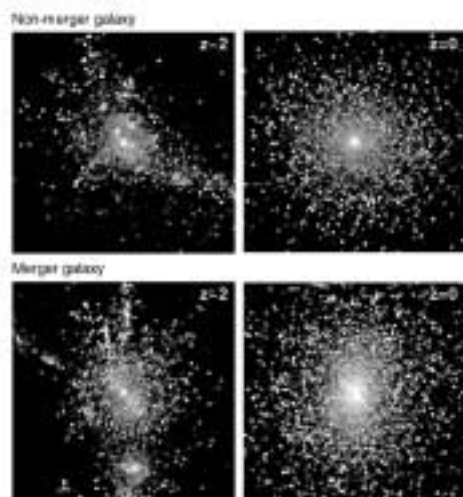


図2：合体銀河(上)と非合体銀河(下)の金属量の分布の時間進化(白が高金属量)

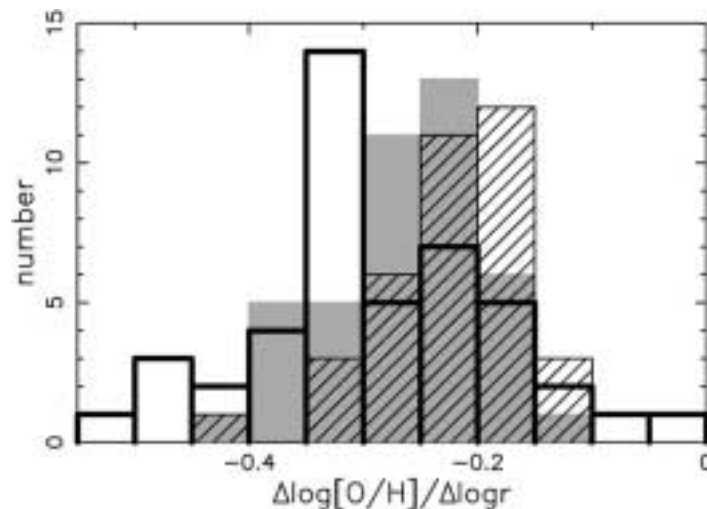


図3：合体を経験した銀河(斜線領域)としない銀河(灰色領域)の金属量勾配の頻度分布, 太線は観測

しょう。90年代までは、ひとつのモデル(例えば天の川銀河のモデル)を詳細に検討するという研究手法だったのが、00年代は複数の高速な計算機を使って、多数のモデルを統一的に検証するという研究手法が可能になりつつあるのです。その具体例と将来について次に述べます。

### 3. 化学進化と力学進化の交錯

銀河の中で、ガスが収縮して星が生まれ、星は元素合成することで輝き、一生の終わりに、超新星大爆発を起こして重元素を星間空間に放出します。これが銀河の化学進化です。同時に銀河の中では、重力によって物質が集まり圧縮され星が形成され動き回るといった力学進化もしています。星々は銀河の中を動き回りながらその時々にはいろいろな場所にいろいろな種類の元素をまきちらしていく、超新星によって星間物質は加熱され、銀河風として銀河の外へ放出される、銀河およびその周辺の星やガスの中にある元素の空間分布には、銀河の歴史が刻まれているのです。銀河を全体と

して見てはいけいない、銀河の中も見入るのです。これは数値シミュレーションによる化学力学進化モデルを用いることで初めて可能になります。その一例として、楕円銀河についての研究を紹介します<sup>9)</sup>。

楕円銀河の形成説には古くから二つの説が対立していました。一つは、大昔にガス雲が収縮して大量の星が一気に生まれ、一時期に集中して起こった大量の超新星爆発が銀河風を起こして残りのガスを外に吐き出したという散逸的収縮説。もう一つは、ガスはたいてい円盤状に降着し時間をかけて星を生み、宇宙に生まれるのはもともとすべて渦状銀河、楕円銀河は二つの渦状銀河の衝突合体によって生まれたとする衝突合体説。二つの説の論争の上で、楕円銀河には中心ほど重元素量が多いという動径方向の金属量勾配が80個くらいの銀河について観測されていて、その勾配は銀河の質量などには依らずばらばらであることが問題でした。散逸的収縮説では大質量の銀河ほど勾配は鋭くなるといわれているし、衝突合体説では金属量勾配は壊れてしまうといわれているからです。合体しても

勾配はそんなに壊れないとか、壊しても星形成で作り直せばいいとかいう議論もありますが、化学力学進化を解いてみせて統計的に調べた例はまだありませんでした。そこで我々は GRAPE を活用して、CDM ゆらぎから 120 個以上の楕円銀河を形成し、金属量勾配の進化を調べ、観測と比較しました。我々の楕円銀河には、多数の矮小銀河の縮合によって形成された後、合体を経験しないものと、同程度の質量の銀河との合体を経験するものと、両方あります。結果、(1) 合体により金属量勾配は確実に浅くなるので、現在の勾配は合体を経験した銀河の方が浅くなることがわかり (図 2)、(2) 勾配の大きさと銀河質量との相関がないことと、(3) 観測された金属量勾配の頻度分布を再現することができました (図 3)。逆に現在の楕円銀河の金属量勾配を観測すれば、その銀河の形成史がわかるということになります。

さらに我々は、元素組成パターンの空間分布にも注目しています。超新星爆発には主に二種類あり、一つ (II, Ib, Ic 型) は大質量星の重力崩壊が原因で、寿命は 10<sup>6</sup>-7 年、主に酸素やマグネシウムを放出します。もう一つ (Ia 型) は連星系における白色矮星の不安定核燃焼が原因で、寿命は大雑把に 10<sup>9</sup> 年、多くの鉄を放出します。この二種類の超新星は異なる時刻に異なる種類の元素を放出する、つまり元素パターンを変えるのです。重元素の総量だけでなく、O16 から Zn64 までの元素パターンまで調べれば、より正確な星形成の歴史を得ることができるはずです。銀河内部の化学的力学的性質の広視野マッピング観測は、SAURON プロジェクトがすでに結果を出し始めていますし、今後の多天体分光観測のよいターゲッ

トになります。また、X 線観測では銀河や銀河団の高温ガスの元素組成が観測されているし、QSO 吸収線系も宇宙におけるガスの元素組成の進化を伝えてくれます。高分散分光器によって、我々の銀河系やマゼラン雲だけでなく、近傍の矮小銀河にある個々の星々の元素パターンが得られています。

すばる望遠鏡など、世界に出そろった 8-10 m 望遠鏡で、観測結果は飛躍的に増大し精度をあげています。これらの観測データから、銀河や宇宙の形成・進化の歴史を明らかにするためには、銀河全体を一様にまぜたり、サイコロで星をばらまくのではなく、物理法則にのっとって星を作り銀河内部の進化を調べたモデルが必要になります。星、ガスと暗黒物質の力学進化と銀河内物質の化学進化を「全体的に」調べるのが大切なのです。90 年代後半、GRAPE の活用により粒子法による銀河モデルの可能性が大きくひらけました。我々のモデルでは、GRAPE を活用したことによる余剰計算能力で化学進化の精度が向上しました。サンプル数も「一」から「百」に増えました。21 世紀、シミュレーション銀河は現実の銀河に近づきます。

## 参考文献

- 1) 中里直人, 2002, 天文月報, Vol.95, 38
- 2) GRAPE project <http://www.astrogrape.org/>
- 3) Sugimoto D., et al., 1990, Nature, 345, 33
- 4) Katz N., 1992, ApJ, 391, 502
- 5) Umemura M., et al., 1993, PASJ, 45, 361
- 6) Steinmetz M., 1996, MNRAS, 278, 1005
- 7) Mori M., et al., 1997, ApJL, 478, 21
- 8) Nakasato N., Nomoto K., 2003, ApJ, 588, 842
- 9) Kobayashi C., 2003, MNRAS, in press