



1. シリコンとファイバ上の天文学

2. 天の川創成プロジェクト



和田 桂一

wada.keiichi@nao.ac.jp

国立天文台

小久保 英一郎

kokubo@th.nao.ac.jp

国立天文台

富坂 幸治

tomisaka@th.nao.ac.jp

国立天文台

台坂 博

hiroshi.daisaka@nao.ac.jp

国立天文台

斎藤 貴之

saitoh.takayuki@nao.ac.jp

国立天文台

牧野 淳一郎

makino@astron.s.u-tokyo.ac.jp

東京大学 大学院 理学研究科

吉田 直紀

nyoshida@a.phys.nagoya-u.ac.jp

名古屋大学 理学部

大規模理論天文シミュレーションによる「天の川創成プロジェクト」とその背景にある銀河形成の問題について紹介します。プロジェクトでは、詳細な理論モデル、計算手法と高速の専用並列計算機を組み合わせ、宇宙初期から現在まで、銀河の形成・進化過程を高精度でシミュレーションすることにより、(1) 我々の銀河系=天の川の3次元構造とその形成過程、および(2) 銀河の形態の起源、を初めて明らかにすることを目指しています。第1期計画では、次世代専用超並列計算機 GRAPE-DR と高速ホスト計算機、高速ネットワークを組み合わせた計算能力1ペタフロップスの「天の川数値解析装置」を国立天文台内に構築し、現状の最大規模のシミュレーションの100倍規模のシミュレーションを行います。これにより銀河形成問題にブレイクスルーをもたらすことができるはずです。

■ 天の川銀河と多様な銀河の世界 ■

太陽系は、「天の川銀河」と呼ばれる、1千億個もの星の大集団=銀河に属しています。天の川銀河は中心部の球状のバルジ(比較的古い星の集団)と渦巻状の円盤部から構成される「渦巻銀河(円盤銀河)」の一種です^{☆1}。その直径は、およそ10万光年ほどもあり、太陽系は、円盤部分の中心から外れた部分に位置しています。つまり、夜空に横たわる「天の川」は、我々の銀河の円盤部分を横からみた姿なのです。しかし、天の川銀河全体の真の3次元構造は実はよく分かっていません。我々自身が天の川銀河の中にいるために、銀河の中の天体までの正確な距離を決めるのが難しいためと、銀河面には星からの光を吸収する星間物質(ガスや塵)が多いために遠くまで見通すことが難しいためです。さらに、太陽系が銀河の中心に対しておよそ2.5億年かけて一周しているように、銀河の構造が変化する時間スケールは非常

に長く、天の川銀河がどのように進化してきたか、現在どのように進化しつつあるか、という「歴史」も観測では直接知ることができません^{☆2}。

銀河は、太陽のような恒星だけではなく、水素や他の原子、分子の多様な相からなる星間ガス、微小な固体物質の星間塵、星間磁場、宇宙線、そしてダークマターといったさまざまな構成要素を含んでおり、それぞれが物理過程を介して密接に関連しています。恒星系、星間ガス、ダークマターの3成分は、主として重力によって相互作用しています。銀河系の質量の大部分を占めるダークマターの存在は、恒星系、ガスの運動から間接的に知ることができますが、その詳しい分布や起源は、いまだによく分かっていません。また、天の川銀河の近傍にある多くの「矮小銀河」や球状星団も広い意味での銀河の構成要素です。それらも銀河の形成、進化と密接にかかわっていると考えられていますが、その詳細は不明です。さらに、最近では多くの銀河の中心には太陽質量の100万倍から10億倍もの巨大なブラックホールが存在しているのが確実視されていますが、なぜ銀河の中心にあるのか、どのように形成されたのかは分かっていません。このように、銀河には多くの謎が残されています。

宇宙全体にはおよそ1千億個のさまざまな形態(渦巻状や楕円状)、質量(天の川の1/1000から100倍)の銀

☆1 さらに細かく分類すると、我々の銀河のバルジは軸対称ではなく、棒状(ラクビーボール状)になっており、「棒渦巻銀河」であるというのが定説となっています。

☆2 間接的には、古い星の分布や運動、金属量などから銀河の歴史を探る「考古学的」手法もあります。

河が存在しています。それらは「ハッブルシーケンス」と呼ばれる分類がされています。この分類は1930年代に行われたものですが、なぜ銀河がこのような多様な形態、大きさを持つのか、という疑問はいまだに解決されていません。宇宙の初期には星も銀河も存在していなく、バリオンとダークマターの微小な「ゆらぎ」がありました。そのゆらぎが重力により成長し、その中で星の集団（原始銀河）が形成され、さらに原始銀河同士が合体し、より大きい銀河に成長した、というのが現在の標準的な銀河形成のシナリオです。その過程のどこかで、銀河の多様性が生まれたと考えられていますが、その理論的な説明は宇宙物理学の重要な未解決問題となっています。

観測的には、今後10年間、大型ミリ波サブミリ波干渉計ALMA (<http://www.nro.nao.ac.jp/~lmsa/>) や、次世代の30mクラスの大型光赤外望遠鏡をはじめとする地上の大型観測装置、宇宙空間光赤外望遠鏡SPICA (<http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/>)、次期宇宙望遠鏡JWST (<http://www.stsci.edu/jwst/>)などがぞくぞくと計画されており、銀河形成期の宇宙についてのより詳しい観測的情報が得られることが期待されています。それらの観測データと相補的な銀河形成理論の構築が急がれます。

■銀河形成シミュレーションの現状と課題■

単純な初期条件から複雑な構造を持つ銀河がどのように誕生し、進化してきたかという、非定常かつ非線形な問題を純粋に解析的手法によって解明するのはきわめて難しいことです。そこで、計算機シミュレーションが威力を発揮します。銀河形成のシミュレーションは、ダークマターとバリオンのゆらぎの初期条件からスタートします。宇宙の中で密度の大きい部分は、宇宙膨張に打ち勝って重力で収縮します。収縮したダークマターのつくる重力ポテンシャル中では、ほとんど水素からなるバリオンの塊（ガス）が輻射によって冷却され、圧力が低下し、さらに重力収縮して密度が上昇します。ガスの力学進化は、自己重力を考慮した圧縮性流体として扱うことができます。そこで密度の高い塊に対し、星形成を起こす条件を課し、ある割合で「星」が生まれたとします。いったん星となると、圧縮性流体とは別の取り扱いをしなければなりません（後述）。現在のところ個々の星を扱うにはシミュレーションの「分解能」が足りないのです。「星の

集団」を1つの粒子で置き換え、その粒子系の運動を解いています。重い星の寿命は宇宙年齢に比べて短く、10万年程度で超新星となって爆発するものもあります。その爆発のエネルギーは非常に大きく、銀河の星間ガスの構造や力学、ひいては星形成に大きな影響を与えます。また、超新星により酸素や鉄などの重い元素が周囲にばらまかれ、星間ガスを「汚染」します。この過程も星間ガスの化学力学進化に大きな影響を与えます。ガスとダークマターを含んだ「星の集団」同士は重力により合体しながら「原始銀河」になり、さらに原始銀河同士が合体し、より大きな銀河（楕円銀河や渦巻銀河）となります（階層的構造形成過程）。この過程の中で、合体から取り残された銀河が矮小銀河となって、母銀河の周りをまわる「衛星銀河」となることもあります。球状星団は、銀河形成の初期の頃に形成された古い星の集団（星の数は10万個程度）と考えられています^{☆3}。

ここで概観したように、銀河形成の過程のシミュレーションは、自己重力が支配している流体（星間ガス）と多体系（星の系やダークマター）の多成分系の非線形進化を追う、ということですが、その際に考慮すべき物理現象は多岐にわたります。流体は、放射により冷えたり、超新星爆発からのエネルギーや星形成領域からの輻射や背景輻射によって加熱されたり、組成が変わります。銀河形成においては流体は高速で運動するために、しばしば超音速となり、衝撃波が重要な素過程となります。また、星間ガスは乱流状態であると考えられていますが、一様乱流でも非圧縮でもないため、理論的に扱うことがたやすくありません^{☆4}。これらの複雑な過程を採り入れて、第一原理からすべてを数値的に解くには現在の計算機の能力は圧倒的に足りません。そこで、分解能以下の現象についてはモデルを導入したり、計算機の能力が同じであれば、計算する銀河のサイズを小さくして、分解能を稼ぐことでモデルの不定性を減らすということが一般に行われます。比較的現実に近い銀河形成のシミュレーションは、1990年代前半に行われ始めました¹⁾。数値流体スキームには、物理量を広がった粒子の重ね合わせで表現し、ラグランジュ的に粒子の運動を追うSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法が広く使われています。この手法は、宇宙における構造形成のようにダイナミックレンジが広く、密度の高い塊同士の合体成長が本質的に重要な現象を扱うのに便利な手法です。星形成は、ある条件のもとでSPH粒子を無衝突系N体粒子（重力でのみ相互作用し、かつ粒子の平均自由行程が長い）に置き換える（あるいは粒子を造る）ことで表現します。一般に、この計算の中で最も計算時間を要するのは、重力相互作用の部分です。粒子間の重力は、その距離の2乗に反比例した万有引力の法則で記述されま

☆3 星間ガスを多く含んだ銀河同士の合体の際にも星の集団が形成されることもあります。

☆4 さらに、星間磁場と部分的に電離した星間ガスの相互作用も重要な過程です。

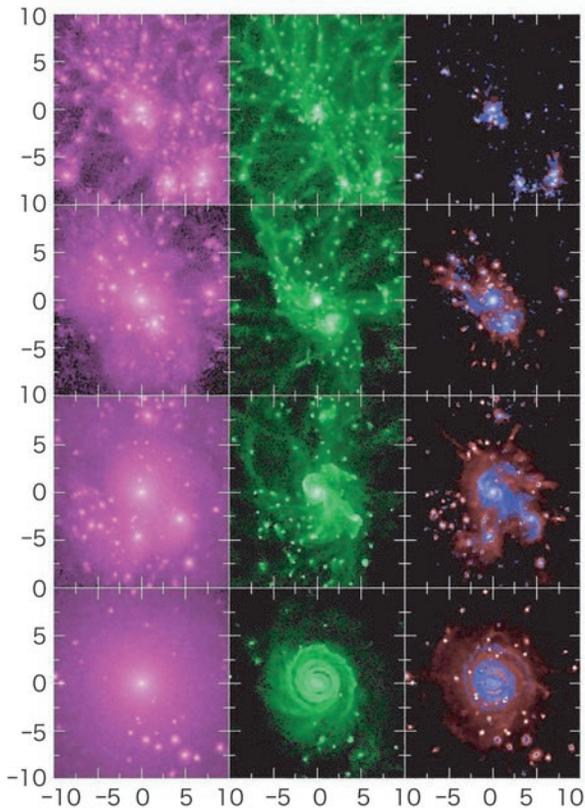


図-1 現状の最高精度の円盤銀河形成シミュレーション (斎藤他). 左からダークマター, ガス, 星の分布の時間発展を示す (上から, 宇宙初期から6億年, 10億年, 15億年, 26億年). 図のサイズは6万光年.

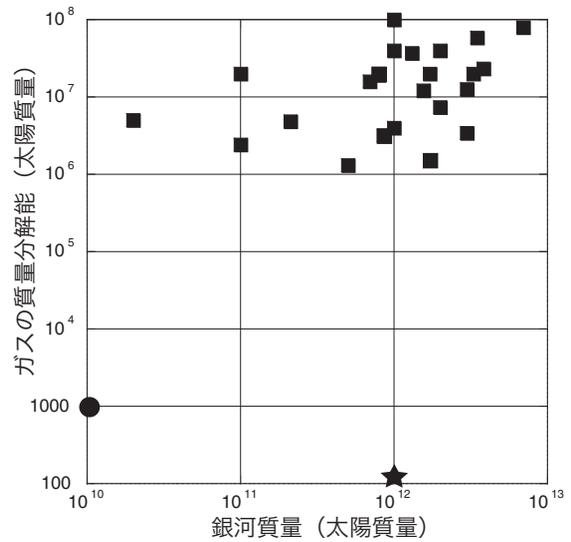


図-2 過去10数年間の円盤銀河シミュレーションにおける空間分解能を銀河の全質量に対してプロットした. 単位は太陽質量. ●は, 図-1に示したシミュレーション. ★は, 天の川創成プロジェクトで目指す分解能と銀河の質量.

すが, 多体系では, それぞれの粒子間の相互作用を計算するために, 粒子の数 N に対して, 演算量は N^2 で増加します. したがって, シミュレーションの分解能をあげて現実 (星の数は $N = 10^{11}$) に近づくほど膨大な演算量が必要となるのです.

図-1に, 我々のグループで行われている銀河形成シミュレーションの例を示します. ダークマターは, N 体系として扱われています. ここでは, 100万個のSPH粒子と100万個の N 体粒子が使われています. これは現在のところ世界で最も分解能がよい銀河形成シミュレーションですが, 銀河のサイズは天の川銀河に比べてまだ1/100と小さいのが問題です. 図-2に, 過去10年ほどの間に世界で行われてきた円盤銀河形成のシミュレーションを示します. 1991年に粒子数1万以下で試みられていたシミュレーションは, 最近では, 粒子数10万程度が標準的です. しかし, その質量分解能は, よい場合で「100万太陽質量」です. 星は, 分子雲と呼ばれる濃い雲の中で誕生していますが, 分子雲の分解には最低「100太陽質量」を分解する必要があります. これには, 天の川銀

河のサイズで, およそ1億個のSPH粒子が要求されます. つまり, 現状の最大の計算の100倍の粒子数, 演算数では1万倍という膨大な計算が必要とされるのです.

重力の計算を高速化するには, アルゴリズムを工夫するほかに, 重力計算に特化した「専用計算機」を用いる方法があります. 我々は, 東京大学で開発が続けられている重力多体問題専用計算機GRAPEシリーズ^{2), 3)} (<http://grape.astron.s.u-tokyo.ac.jp/grape/>) を用いています. 国立天文台天文学データ解析計算センターには共同利用計算機としてGRAPEのクラスタが導入されています (MUV: Mitaka Underground Vineyard) (<http://www.cc.nao.ac.jp/cc/muv/>). 図-1のシミュレーションには, MUVのGRAPE-5⁴⁾が用いられています. GRAPE-5ボードのピーク性能は約40GFlops, ホストコンピュータは, Alpha21264 833MHz (現在はPentium4 3.4GHzにリプレースされています). このシステムを用いて宇宙初期から現在までのおよそ120億年間の銀河形成のシミュレーションに, ほぼ300日が費されました.

■ ブレイクスルー目指して ■

前章で示したように、世界にはスーパーコンピュータ（ベクトル計算機やベクトル並列、あるいはスカラ並列機など）を用いて銀河形成シミュレーションに取り組んでいるいくつかのグループがありますが、「天の川銀河」の形成シミュレーションは諸外国のどのグループもいまだ成功していません。1つの理由は、「正しいシミュレーション」に要求される分解能およびそれを達成するための計算機の性能に比べ、現状のスーパーコンピュータの性能が圧倒的に不足しているためです。また、多くの高速の計算機システムは汎用で、銀河形成の問題だけに長期間占有して使うわけにはいきません。

そこで、我々は、天の川銀河形成問題専用の計算機実験システム＝「天の川数値解析装置」を構築するプロジェクトを立ち上げました。このプロジェクトでは、恒星間や星間ガスとの間の重力について、新たに開発・運用する専用の超高速計算機システムにより、世界で初めて、ダークマター、恒星および星間ガスからなる天の川銀河の形成過程を物理法則に基づいて正確にシミュレーションします。それにより、(1) 天の川銀河の構造と形成進化の過程、(2) 銀河の形態（ハッブルシーケンス）の起源等の解明を目指しています。

天の川数値解析装置は、GRAPE-DR クラスタおよび high-performance コンピュータ（HPC）から構成されます。GRAPE-DR は、東京大学大学院情報理工学系研究科（平木教授）および理学系研究科（牧野）を中心として2004年度から立ち上がった新しいプロジェクトにより開発される次世代の超並列専用計算機です（<http://grape-dr.adm.s.u-tokyo.ac.jp/>）。GRAPE-DRチップは1チップ内に1,024個の演算プロセッサを実装し、それをカードあたり8個搭載して、8TFlopsのピーク演算性能を実現します。GRAPE-DRカードを搭載したPC 128台程度を10 Gbpsの高速ネットワークで接続し、システム全体として1Peta Flopsのピーク演算性能を実現します。HPCは、このGRAPE-DRシステムと高速ネットワーク

で接続し、GRAPE-DR クラスタで高速化できる計算（たとえば重力計算）以外の銀河形成において重要なさまざまな物理過程（輻射輸送、化学進化など）を計算させます。

計算結果は、国立天文台内に設置する予定のドーム型シアター型次世代「4次元デジタル宇宙シアター」用に可視化を行い、3次元スクリーン上に天の川銀河の形成過程を再現する予定です。4次元デジタル宇宙シアターは、現在3面スクリーン型のものが国立天文台キャンパスで一般公開されています（本特集の小久保氏の記事「4次元デジタル宇宙プロジェクト」, pp.1229-1233参照）。次世代のシアターの開発は、2004年度科学技術振興調整費により開始されました。このようなシアターにより、研究者のみならず、一般市民に我々が住む天の川銀河の構造と歴史を分かりやすく示すことができるはずです。

天の川創成プロジェクトでは、現在関係各方面に予算の要求を行っているところです。究極的な目標は天の川銀河1,000億個の星を個々に取り扱うことですが、第I期計画（5～6年）では、10億個程度のN体粒子、1億個程度のガス粒子で銀河形成過程をシミュレーションすることを目標としています。実現するとこの分野で世界を圧倒的にリードすることになります。銀河形成シミュレーションはいわば「総合天文学」です。理論研究者のみならず観測研究者や計算機科学、情報処理の専門家などの多くの方の協力が不可欠です。本会誌の読者の皆様にもご協力をお願いすることもあるかもしれません。その節はぜひよろしく願いいたします。

参考文献

- 1) Katz, N. and Gunn, J. E.: Dissipational Galaxy Formation. I - Effects of gasdynamics, *Astrophysical Journal*, Vol.377, pp.365-381 (1991).
- 2) Sugimoto, D., Chikada, Y., Makino, J., Ito, T., Ebisuzaki, T. and Umemura, M.: A Special-Purpose Computer for Gravitational Many-Body Problems, *Nature*, Vol.345, p.33 (1991).
- 3) Makino, J., Fukushige, T., Koga, M. and Namura, K.: GRAPE-6: Massively-Parallel Special-Purpose Computer for Astrophysical Particle Simulations, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.55, pp.1163-1187.
- 4) Kawai, A., Fukushige, T., Makino, J. and Taiji, M.: GRAPE-5: A Special-Purpose Computer for N-Body Simulations, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.52, pp.659-676.

(平成16年11月5日受付)

