

## 宇宙の大構造と銀河の形成

須藤 靖\*・梅村 雅之\*\*

無数の銀河が織りなす宇宙の大構造。それは数億光年を越える超巨大なネットワークであり、そこには宇宙誕生以来の歴史が凝縮されている。宇宙の大構造と銀河の誕生は、現代宇宙論の最大のテーマの一つになっており、これらの研究はスーパーコンピューターと共に新たな展開を見せつつある。ここでは、無衝突粒子系による宇宙の大構造の形成と、宇宙論的流体力学による銀河集団形成のシミュレーションを紹介する。

### I. 宇宙の大構造

#### 1. 宇宙論における数値実験

宇宙の初期条件をつきとめることは宇宙物理学における最終目標の一つである。このことは当然、より過去をしたがってより遠くの宇宙の姿を観測することを意味するが、これは膨大な時間と労力を要する作業である。しかもそれによって我々が直接得ることのできる情報は残念ながらかなり限られたものにならざるを得ない。したがって、何らかの作業仮説の下で観測を行なうことは不可欠であり、ここに理論の存在価値がある。話を宇宙の大規模構造および銀河形成の分野にのみ限ったとしても数多くのモデルが提唱されているが、これらはそのままでは定量的な予言をしていることは希であり、実際の観測に結びついたものにはなっていない。つまりこのままでは、理論と観測の間のフィードバックが有効に機能しない状態にある。この純粋な理論モデルと観測結果のギャップをうめる役割を担うのが数値実験である。

#### 2. 宇宙の大構造のシミュレーション

宇宙の大構造という言葉自身あまり明確に定義されているとは言い難いが、通常は銀河の空間分布のパターンをさしていると考えて良からう。現在（少なくとも原理的に）観測可能な宇宙の大きさ  $\sim 3000$  Mpc 内にはおよそ  $10^{10}$  個の銀河が存在する。この  $10^{10}$  個の“質点”がつくる自己重力多体系が我々の宇宙に対する第0近似である。しかしながらこの極度に単純化されたモデルの力学でさえも解析的な答えを見いだすことは不可能に近い。これは、重力が極度に非線形かつ長距離力であること、宇宙は膨張しているために平衡状態にはなく統計力学的な手法を適用できる状況がきわめて限られていること、などによる。たとえ数値実験にしてもこれだけの粒子数を扱うことは（現時点では）不可能であると言わざるを得ない。このために宇宙の大構造の形成を数値実験

によって詳しく調べることが行なわれている。もっとも手っとり早い方法として、計算機の中に多数個の点粒子をばらまきそれらの運動をニュートン力学によって解く、というものがあ、宇宙論的  $N$  体数値実験と呼ばれている。

従来行われてきた計算では粒子数  $N$ 、として  $10^3 \sim 10^4$ 、典型的には 30000 体、程度のもを考える。したがって1個の質点が銀河を表現するとすれば宇宙の中のごく一部分のみ ( $< 100$  Mpc = 3 億光年) をとりだして考えていることに対応する。一方、宇宙は 100 Mpc 程度以上のスケールでみれば一様・等方であるといった表現を耳にすることが多いが、これは必ずしも観測的に支持されているわけではなく、それ以上の階層構造の存在が知られてはいないという消極的な意味に近い。むしろ観測的には、今までに発見された宇宙の最大の構造（例えば最近では 100 Mpc スケール）は、常にその当時観測できた領域の大きさそのものに極めて近いという事実がある。つまり、より深く、より遠くが観測できるようになればなるほど、今まで見えなかった大構造が認識可能になるというのが現状である。さらに最近では、銀河分布に 128 Mpc 周期のピークがみられるという報告もあり、もし事実であるとすれば、宇宙の最大の構造のスケールは我々の想像を越えたものであるかもしれない。

したがって、より大きな（すなわち  $N$  の大きい）数値計算をすることは本質的な要求である。幸いなことに、宇宙論では暗黒物質を何に仮定するかを決めてしまえば線形理論の範囲で密度ゆらぎのスペクトルなどの初期条件は第一原理から計算できる。その意味では以後の非線形計算の精度の範囲内において理論の予言は一義的である。数値計算によって得られた理論的予言は、様々な観測事実との比較によって、宇宙の質量密度、ハッブル定数などの基本的なパラメータをいくつかの独立した方法で決定することを可能にする。では逆にどのくらいの計算を行えば質的に新しい結果を期待し得るのであるうか？

宇宙の大構造として、いわゆる超銀河団を考えると、

\* 京大基研学治 Yasushi Suto, \*\* 国立天文台 Masayuki Umemura: The Large-Scale Structures in the Universe and Galaxy Formation

銀河との質量比は  $10^3 \sim 10^4$  程度，したがって統計的有意性を考えて  $10^2 \sim 10^8$  個の超銀河団の形成を計算することにすれば  $\sim 10^6$  個の銀河を扱うことが必要である。つまり現在よく行われている計算に比べて約 2 桁多い粒子数を用いることで初めて暗黒物質と宇宙の大規模構造とを統一的に記述し得ることになる。

3. 数値実験の例

現実には，上で述べた  $N=10^6$  個の多体系の数値実験は決して易しいものではない。重力は 2 体力であるからその力の計算には， $\sim N^2$  に比例した回数の演算を必要とするからである。例えば，1 対の粒子間の重力の計算に約 100 個の演算が必要であるとすれば，系全体としては  $10^{14}$  回の演算が必要である。現在稼働中のスーパーコンピュータは，最高 1 秒間に  $10^9$  の演算を処理できるが，それをもってしても 1 ステップの計算に丸 1 日かかるわけである。1000 ステップの数値実験を行なおうとすれば，3 年かかることになる。さらにこれを大学のコンピュータセンターでやろうとすれば，他の約 100 人のユーザーと計算機の時間を民主的に分割することになるから，たった一つの計算に実に 300 年 (!) を費やすはめになる。さらに蛇足ではあるが，現在，大学のスーパーコンピュータでは 1 時間約 1 万円の課金をしているから，計算費にも 2 億円以上かかるはずである。

この困難を克服する手段は大きく分けて 3 つである。

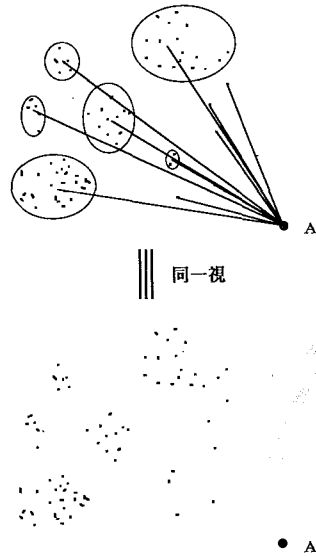


図 1 ツリー法に基づく重力計算の近似

- 1) より高速の計算機を用いる。
- 2) 近似的に重力を計算する高速のアルゴリズムを用いる。
- 3) 諦める (あるいは，転職する，別のテーマを捜す，等)。

最も支持される可能性の高い 3) をあえて除外すると，1) は重力専用プロセッサを作るというハード側からのアプローチであり，このシリーズの 8 月号の記事を参照

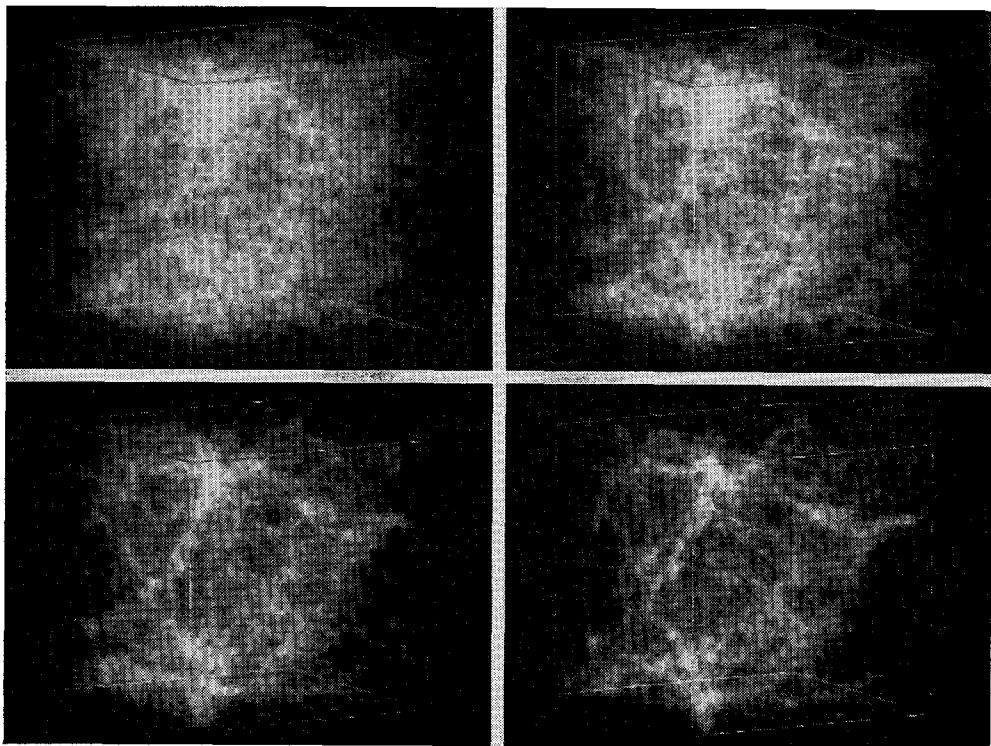


図 2

されたい。伝統的には、2)のソフト的な努力がなされている。例えば、空間を格子状に分割し、その上での重力ポテンシャルを求め、それを補間して粒子の力を求める等の方法である。この場合、Fast Fourier Transformを用いることで計算時間が  $N \log N$  に比例するだけで済む。我々は、ツリー法と呼ばれるアルゴリズムに基づいて数値実験を行なっている。この方法のエッセンスは、図1の粒子Aの重力を計算する際に、遠方の粒子をいくつかまとめて1つの粒子群として近似的に扱うことにある。このグループ化のおかげで、実際の計算時間は  $N \times N_g$  に比例する ( $N_g$  は各粒子からみた平均のグループ数)。我々の採用しているグループ化の方法では、 $N_g$  は  $\log N$  に比例しており、KEKのS-820/80の場合、 $N=10^8$  の粒子系の重力計算が約150秒で終了する。つまり単純な  $N^2$  アルゴリズムにくらべると1000倍の高速化である。

図2に我々の数値実験の計算例を示す。初期に与えた小さい空間的な密度のゆらぎが、宇宙膨張にともなって成長し宇宙の大構造を形成していく様子をシミュレートしたものである (Suginohara and Suto 1990)。

現在のスーパーコンピュータの性能と、それを効率よく利用するためのアルゴリズムの開発の両面によって、10年前には全くの夢であった大型数値実験が宇宙論の分野においても現実のものとなっている。これによって、現在着実に蓄積されつつある観測データとの定量的な比較が可能になった。スーパーコンピュータによって、純粋に理論的な分野であった宇宙論が、実験科学に昇格したと言えるのでは言い過ぎであろうか? (須藤 靖)

## II. 銀河集団の形成

### 1. “大から小”か? “小から大”か?

宇宙の大規模構造がどのようにして発生したかは宇宙論の大問題である。まず素朴な疑問として“銀河と宇宙の大構造とどちらが先にできたか?”という疑問があるが、現在これすらはっきりわかっていない。考え方は二通りあって、一つはまず宇宙の中で大規模なパターンが成長し、物質が非常に集中した所と、希薄な所が多数出現した。そして、物質の集中した領域は銀河の苗床となり、ここで数多くの銀河が誕生したという考え方である。これが“大から小”の説である。もう一つは上と全く逆で、まず銀河が誕生し、それが寄り集まって銀河集団を作り、大規模構造を作って行ったとするものである。これが“小から大”の説である。前述の須藤氏の数値実験は、後者の説に基づくものである。

ここでは、前者の“大から小”説に基づいた銀河集団形成の数値シミュレーションを紹介しよう。

### 2. “ゆらぎ”はどこから?

宇宙空間の物質の濃淡を“密度ゆらぎ”または単純に“ゆらぎ”と呼ぶ。このゆらぎがあれば、物質の多いところはそれだけ自己重力が強くて効いて、物質の集中がますますきつくなり、銀河の苗床を作ることができるが、ゆらぎが全くない宇宙では、大構造も銀河も生まれようがない。では、ゆらぎはいったいどこから来たのだろうか? それは“ビッグ・バン”の直後、プランク時間 ( $10^{-43}$  秒)の頃に量子的ゆらぎから生まれたという説が今の有力である。この頃に、ゆらぎの起源があったとしても、それが何のゆらぎなのかによって、その後の振る舞い方は随分違う。自然界には、原子核を構成している陽子・中性子といったバリオンと電子やニュートリノ等のレプトンがある。バリオンの断熱的なゆらぎは、電離ガス状態であった宇宙が中性化する時期(宇宙年齢30万年)までに  $10^{14} M_{\odot}$  より小さなゆらぎは減衰してしまう。一方ニュートリノの場合には、この粒子に電子の一万分の一 ( $10^{-31}$  g) 程度の質量があれば、宇宙年齢1万年という早い時期に  $10^{15-16} M_{\odot}$  以下のゆらぎはすべて消失してしまう。このため、最初に  $10^{15-16} M_{\odot}$  の構造ができることになる。これは宇宙の大構造の基本的サイズと一致する。この意味でニュートリノ宇宙モデルは“大から小”説の中でも極めて魅力的なものである(月報1984年7月号171ページ参照)。

### 3. 銀河の誕生

銀河がどのようにして誕生したかを見た者はまだいない。しかし、近年のスーパーコンピュータの発達は、大構造から銀河が誕生する様子を計算機でシミュレートすることを可能にしている。ここで、ニュートリノが作る大構造から銀河が誕生するまでの大規模な数値シミュレーションを紹介しよう。

銀河は星と星間ガスといった光で見える部分とダークマターという光らない物質からできている。前者は、詰まるところバリオンであるが、後者は今の場合ニュートリノということになる。従って、このシミュレーションではバリオンガスとニュートリノを一緒に計算しなければならない。しかも扱う系は3次元であり、すべて自己重力系である。3次元自己重力系のガスダイナミクスはスーパーコンピュータなくしては計算不可能な分野である。ここで紹介するシミュレーションはFACOM VP200というスーパーコンピュータで100時間のCPU時間をかけて行ったものである。ここではガスダイナミクスの計算にSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) と呼ばれる3次元の流体力学コードを用いた。このコードはガスの分布を球状のガス粒子の重ね合わせで表現するものである。

まず宇宙空間の中から典型的なサイズ  $10^{15} M_{\odot}$  の球対

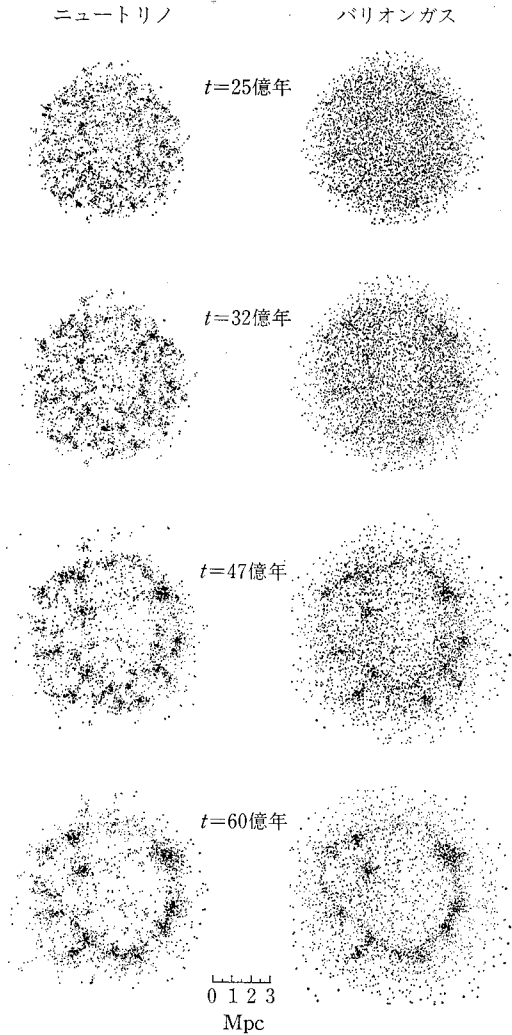


図 3 パンケーキが分裂し銀河ができるまでの時間変化。左側はニュートリノ，右側はバリオンガスの分布を示している。時間は宇宙年齢である。

称の領域を切り出してこよう。この領域はゆらぎがなければ、球対称のまま宇宙膨張と共に膨張するだけで何の変化も起こらない。ところが、わずかなゆらぎがありほんの少しだけ球対称からずれていると、このずれた方向に自己重力が強く働くためこの領域は膨張から取り残され次第に変形してくる。このゆらぎの成長は、成長を始める時期(宇宙年齢 1 万年)から宇宙年齢 4 億年までは、球対称からそれほど大きくずれない線形成長段階なので解析的に追うことができる。その後の進化は、ゆがみが大きくなり非線形効果が強く効いてくるので数値計算でなくては追えないようになる。ここでは宇宙年齢 4 億年で、 $z$  方向に 50% の密度ゆらぎをもつような解析解から始めて、宇宙年齢 60 億年までの進化を追ってみた。

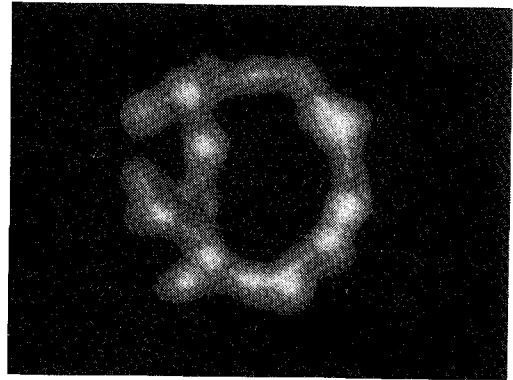


図 4 パンケーキの分裂によってできた銀河集団のバリオンガス分布を 3 次元コンピューター・グラフィックスによって描いたもの。

宇宙年齢 10 億年の頃に、 $z$  方向のゆがみは最大限に達しこの方向につぶれてしまう。このとき  $z$  方向に非常に強い衝撃波が発生し、ここでガスは温度が  $10^7\text{K}$  を越える高温プラズマとなる。このつぶれた状態は、ちょうどパンケーキのような形であるため、このシナリオは“パンケーキ説”とも呼ばれている。パンケーキの内部には  $10^4\text{K}$  の比較的低温の低い中性ガス層が形成される。宇宙年齢 25 億年になると、中性ガス層の自己重力によってパンケーキの表面に模様が見え始める(図 3)。これは、宇宙年齢 32 億年で銀河の数分の一ほどの多数の固まりに成長し、宇宙年齢 47 億年の頃には、これらの固まりが合体を始める。と同時に、パンケーキの外側で自己重力による減速が強く効くため、中心付近の外向きの運動とぶつかって全体が帯状の構造を呈するようになる。そして宇宙年齢 60 億年で、 $10^{12} M_{\odot}$  の典型的銀河サイズの固まりが帯状に分布した原始銀河集団が誕生する。これは、我々の太陽系誕生の 40 億年前の時代である。図 4 に宇宙年齢 60 億年のパンケーキのバリオンガス分布を 3 次元コンピューター・グラフィックスで描いたものを示した。この図で原始銀河の固まりとリング状につながったフィラメント構造がよくわかる。

#### 4. はじまり

銀河は一つの生命体の様なものである。その中では、ガスから星が生まれ、超新星爆発して再びガスに帰るといった新陳代謝を繰り返す、成長しそして年老いて行く。銀河の誕生から死までのシナリオを作り上げるのには、まだ遠い道のりがある。しかし、次世代のスーパーコンピューターは、この夢をかなえてくれるかもしれない。宇宙の大構造と銀河の誕生の本格的な研究は今始まった所である。それは、まさにスーパーコンピューターと共にあるといっても過言ではない。(梅村雅之)