

宇宙の構造形成のコンピューターシミュレーション

1. 宇宙の実験

自然科学研究では多くの場合、「ある仮説をもとにして実験を行い、その結果によって理論やモデルを検証する」という手順を踏みます。物理学や化学、生物学ではこのような手続きを経て様々な仮説の検証が行われますし、実験結果からまた新たな仮説を考え、次の実験のアイデアを得ることもあるでしょう。このような研究活動は楽しく、ワクワクするものです。

ところが残念なことに、天文学では「あるアイデアにしたがった実験」を行うことはほとんどできません。取り扱う対象がとてつもなく大きいので、人為的な設定を実現することができないのです。もちろんいろいろアイデアはわいてきます。太陽をぐるぐると高速で回転させたらどうなるのでしょうか。膨らむのでしょうか、あるいは外側のガスが飛んでいってしまうのでしょうか。ブラックホール同士がぶつかったら、お互いに飲み込み合うのでしょうか。このような素朴な疑問は考えるだけでも楽しいですし、また実際に宇宙物理学でも重要な問題です。でも、本当に太陽をぐるぐる回す実験はできませんし、銀河を衝突させる実験もできません。長さが数億光年にもおよぶ宇宙の大規模構造なんて、自作したくてもその部品は東急ハンズでも売っていません。

もちろん天文学には天体観測という強力な手段があり、現在では電波やX線など、様々な波長の電磁波

で一つの天体を詳しく観測することができます。地球に向いている面しか見えないとか、奥行きがわからないとか、いくつか制約はあるものの、最新の望遠鏡や観測装置を使えば天体の複雑な構造を手にとるように知ることができるようになりました。それでもやはり、銀河が成長する様子を見たり、冒頭で述べたように何かアイデアをもとにして新たな天体形成の理論をたしかめることはできないのです。そんなことができればどれほど研究が進むことかと、もどかしい思いさえ抱きます。

さいわいなことに、一つ特殊な方法があります。直接にはできない代わりに、コンピューター上に仮想的な宇宙をつくりあげ、その中で天体がどのように誕生するかを再現することならできます。実物を用いた実験の代わりに、コンピューターによる「数値実験」を行えば、星を回転させることも、銀河を衝突させることもできます。このような仮想的な実験では検証方法としてころもとないたと思われるかもしれませんが、いくつか条件を満たしていればとても強力な手段になります。特に天文学では理論研究、宇宙観測にくわえてコンピューターシミュレーションが第三の重要な研究手法として発展してきました。いまでは独立した第三の手法というよりは、理論と観測結果を直接むすびつけたり、観測計画立案のために使われたりと、あらゆる場面で活用されています。

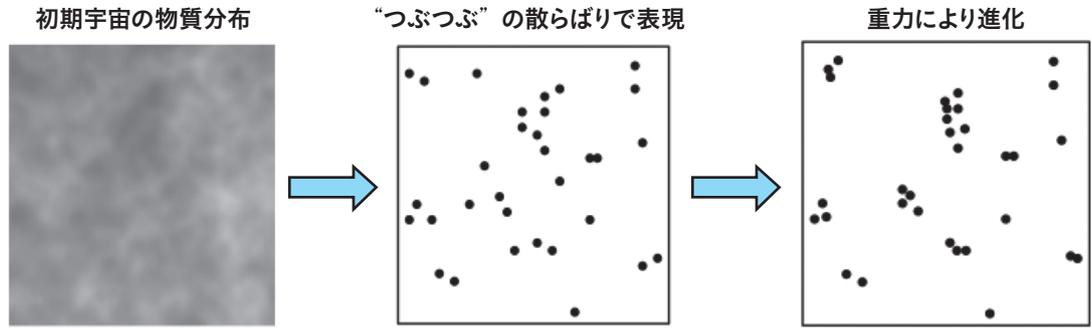


図1 むらむらから銀河団まで。宇宙の構造形成シミュレーションでは、はじめに滑らかな物質分布（左図）をつぶつぶの散らばり具合で表現し（中央）、粒子（つぶつぶ）の重力進化をコンピューターで計算する。右下の式は、ある粒子に加わる、他の粒子からの重力の和と、それによる粒子の運動を記述する。

$$\frac{d^2x_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} Gm_j \frac{x_j - x_i}{|x_j - x_i|^3}$$

2. コンピューター上の仮想宇宙

コンピューターシミュレーションは自然科学や社会科学、またそれ以外でも実に様々な場面で威力を発揮しています。最近では気象や地震現象のシミュレーションがテレビの解説などでも使われていますから、シミュレーション結果を見やすく可視化した動画を目にする機会も多くなりました。重要な情報伝達手段の一つとしても受け止められているようです。

実際には同じ「シミュレーション」という言葉を用いていても、分野によってその役割は少しずつ異なります。ここで、私がなぜ宇宙論のシミュレーションに魅力を感じ、発展の可能性を見つけ、そして自らの研究の主な手段としているかお話ししましょう。その理由は簡単に言えば「初期条件」がはっきりしているからです。最近の大型望遠鏡を用いた観測や、宇宙マイクロ波背景放射の観測のおかげで、宇宙が生まれた頃の様子が明らかになり、また宇宙の構成要素、宇宙膨張の歴史なども分かるようになりました。コンピューターで計算をすすめるにあたって必要なのはその初期値あるいは初期条件です。宇宙論ではなんとその初期条件——実際には宇宙創生から38万年後の姿——を

観測によって詳しく知る事ができるのです。

宇宙論のシミュレーションで重要な事柄がもう一つあります。星やブラックホールなどの天体の形成を理解するためには、一般相対性理論や原子核物理、輻射過程など、大学や大学院で学ぶ高度な物理学が必要となります。しかし、数億光年にもわたる宇宙の大規模構造の形成を考える際に重要なのは実は重力だけです。しかも多くの場合、ニュートン力学、つまり高校や大学初年度で学ぶ基本事項で事足りることも多いのです。自然界には重力の他に3つの相互作用（力）が存在することが知られていて、それぞれ電磁気力、弱い相互作用、強い相互作用とよばれます。電磁気力は磁石などで実感できるのでなじみ深いものですね。一方、弱い相互作用や強い相互作用は原子核や素粒子の反応に関わるもので基本的には微視的な過程で重要となります。つまり、宇宙の構造のサイズではさほど重要ではありません。もちろん上記のいずれも、宇宙初期での進化には多くの役割があったのですが、やがて銀河や銀河団などの大きな天体が形成される際には重力だけが主要な物理過程となります。このように、宇宙の構造形成を理解するには、観測された初期状態から発展して、膨張する宇宙の中で物質同士が重力に

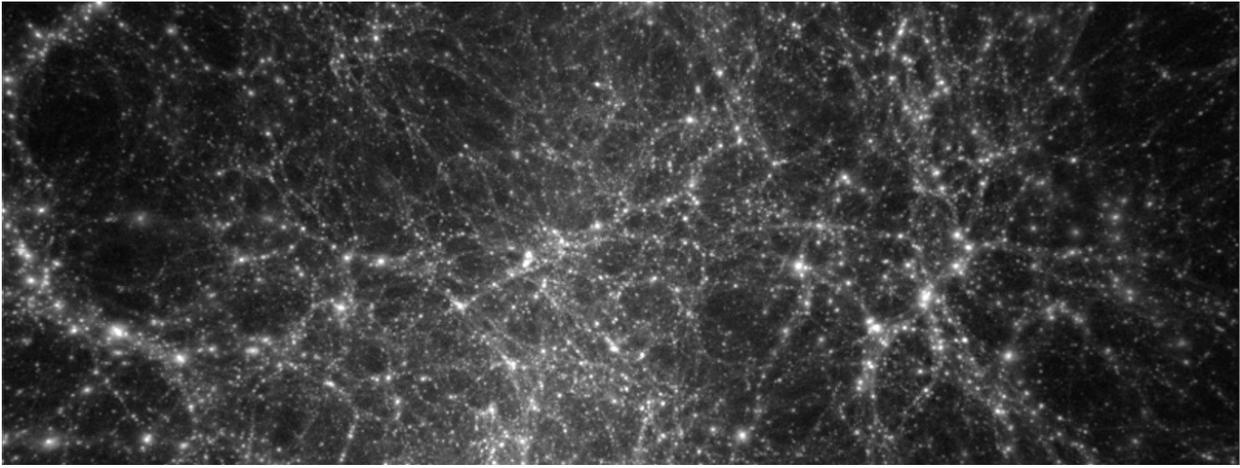


図2 シミュレーションによって得られた、現在の宇宙のダークマター分布。1億光年×3億光年の領域の中で、色の明るい部分にはダークマターが集中している。

よってどのように集まるのかという、とてもシンプルな問題を解けばよいと期待できます。

3. 初期宇宙のむらむら

今では衛星観測によって生まれたての宇宙の姿を詳しく観測できますが、宇宙初期の密度揺らぎはそもそもとても小さなものです。よく、水深100メートルの湖の水面に1ミリメートルのさざ波が立つ程度だと例えられます。波の高さあるいは振幅が小さいと、線形理論を使うことができます。簡単に言えば、波の振幅が時間とともに単調に増加するのです。また、波の重ね合わせといって、いろんな波長をもつ波が互いに干渉しないという性質も持ちます。この線形理論を使えるおかげで、数式を使って初期宇宙での物質分布の時間進化を正確に予言することができます。

さて、初期宇宙の密度揺らぎには大きな特徴が一つあります。それは「揺らぎがガウス統計に従う」という観測事実です。シミュレーションをする観点からは、波の波長と振幅の関係が全ての統計的情報を含んでいるということが最も重要です。いろんな波長の波の振幅と位相（波の山と谷の位置）さえはじめに決めてしまえば、それらの波の重ね合わせによって生じる物質分布が完全にきまります。マイクロ波背景放射の観測

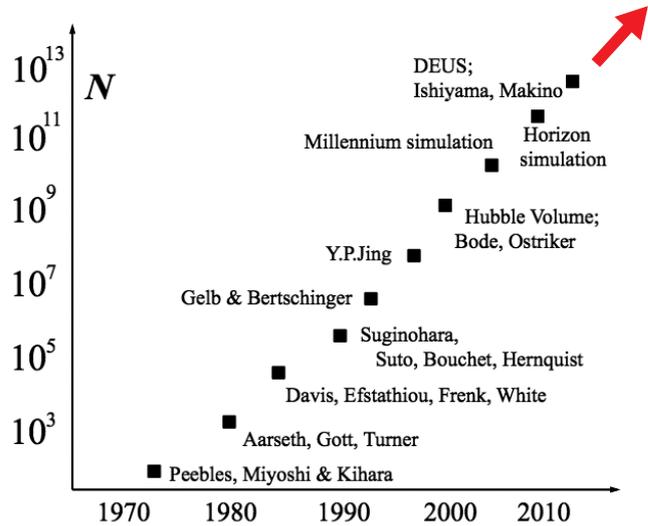
によって、ある時期の物質分布が分かれば、それと統計的には同等の宇宙を作り上げることができます。もちろんコンピューター上での話です。

4. 重力N体シミュレーション

あとは重力によって物質が集まる様子を追えばよいことになります。宇宙初期の物質分布を多数の粒子（つぶつぶ）の分布で置き換え、粒子の間に働く重力を計算します。粒子の速度は互いの重力により時々刻々と変化し、また位置もどんどん変化していきます（図1）。その様子を追う事で、空間全体が膨張する宇宙の中で物質が集まって塊をつくり、その中で天体が生まれる様子を調べることができます。このような数値実験を宇宙論的N体シミュレーションとよび、その歴史は40年ほどにもなります。

1970年代には数百個の粒子（銀河）の重力相互作用を計算し、銀河団の誕生や宇宙の大規模構造の研究などが行われていました。なお、その黎明期には東京大学の三好和憲と木原太郎により、宇宙の構造形成の先駆的N体計算が行われていたことは特筆すべきだと思います（図2）。東京大学物理学教室の木原太郎は統計物理学を研究しており、銀河の分布を定量化するために2点相関関数を用いることを提案しました。相

図3 宇宙論的シミュレーションの進化。横軸に研究発表年、縦軸に使用粒子数を表している。粒子数は過去40年で10億倍にもなった。計算粒子数の増大は、コンピュータの速度向上やメモリ増大によるところも大きい。重力相互作用を効率よく計算するアルゴリズムの発展も重要であった。図中■印の横には、計算を行った研究者、あるいはシミュレーションプロジェクトの名称を記した。これらの計算では、高解像度で一つの天体の内部構造を明らかにしたり、あるいは広大な領域を設定して宇宙の大規模構造の形成を再現した。筆者は大学院生の頃に2000年代の二つの計算に貢献した。



関関数は現代宇宙論で最も重要な統計量の一つです。IPMUですすめるSuMiRE計画でも遠くの銀河の相関関数を測ることにより宇宙の幾何学やダークエネルギーの性質に迫ろうと研究が続けられています。

シミュレーションの規模は、1970年代は粒子数百個を用いる程度でしたが、以降、計算機の性能自体が日進月歩で向上してきたことも重なり、使用粒子数はまさに倍々ゲームのように増加し、40年で10億倍にもなりました。現在では1千億個に近い数の粒子を用いたシミュレーションが行われています。一般に粒子数が大きければ大きいほど、宇宙のより大きな構造のシミュレーションを行うことができます(図2)。また、一つの天体、たとえば銀河の形成を知りたいのであればその内部構造まで詳細に調べることができます。簡単にいえばたくさんの粒子を使うと「良い」シミュレーションを行うことができるのです。

このまま行けば、あと数年で使用粒子数は1兆個に達することが予想されます。1兆個の粒子を用いたシミュレーションは、私のような宇宙物理学の研究者の一つの夢であると言ってもよいでしょう。単に規模が大きくなるというだけではなく、銀河の形成進化の研究分野において、まったく革新的なシミュレーション

が行えるようになるのです。1兆個の粒子を用いれば、天の川銀河の中の全ての星を一つ一つの粒子に置き換えて計算することさえできます。渦巻き状や楕円体など、さまざまな美しい姿をもつ銀河がどうしてそのような形態になったのか、その謎が解けるようになるのかもれません。

5. 宇宙論的シミュレーションの将来

スーパーコンピュータや専用計算機の進歩とともに、宇宙論的シミュレーションはどのような発展をとげるのでしょうか。図3に示した宇宙論的N体シミュレーションの進化をそのまま単純に期待すると、今から半世紀経って、2073年に私が100歳の誕生日を迎えるころ、シミュレーションに使用する粒子数は10の23乗個、アボガドロ数に匹敵するようになります。この数はまた、私たちが観測できる宇宙の中にある星の数にもほぼ等しいものです。つまり、宇宙にある星の全てを一つ一つ粒子で置き換えることさえできます。

しかし、実際にはそのような「単純な」計算を行うことはないだろうと私は思っています。技術的には可

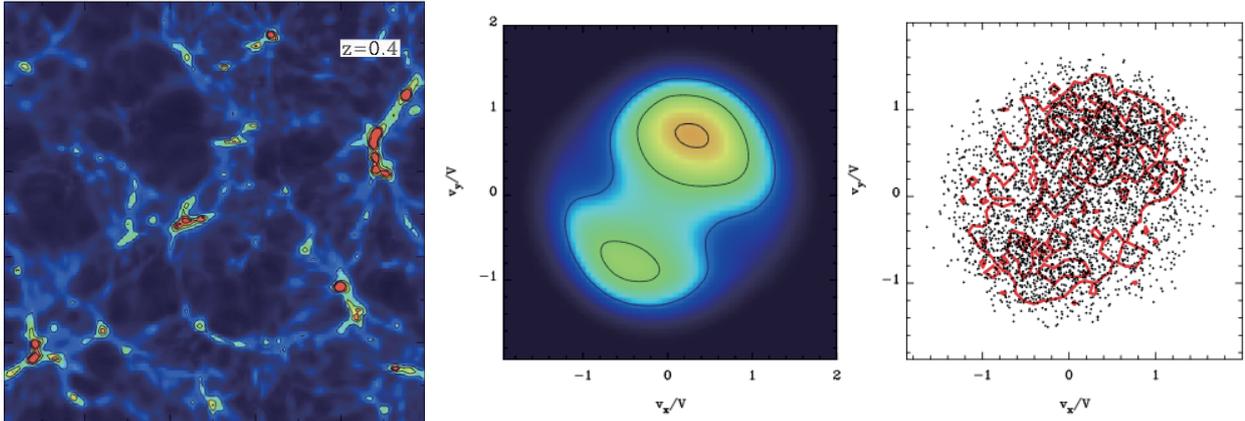


図4 ボルツマン方程式を解くことによって得られたダークマター分布(左図)。現代のN体シミュレーション(図2)と比べれば空間解像度は劣るが、表示された領域の一点一点で、速度空間上の分布が滑らかに表現されている(中央)。右図は、同じ速度分布を従来のN体シミュレーションで計算したものは、粒子分布を均して得た速度分布の形状を表す。

能になるかもしれませんが、今から何十年も経てば、重力N体計算そのものが歴史上の(つまり、古い)手法となっているに違いないと思うのです。

ここまでは、図1のように、仮想的な粒子(つぶつぶ)の運動をニュートン力学の問題として記述してきました。本当は、宇宙を満たす膨大な数のダークマター粒子の運動を支配する基礎方程式は粒子の速度の分布を記述するボルツマン方程式と重力のポアソン方程式です。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \nabla \phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = 0$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho = 4\pi G \int f d^3 \vec{v}$$

この式で、分布関数 $f=f(x, y, z, u, v, w)$ は空間中のある場所 (x, y, z) において速度 (u, v, w) を持つ粒子がどのくらいの数あるのかを表します。それを全ての速度について積分すると物質密度 $\rho(x, y, z)$ が得られ、重力のポアソン方程式(2つ目の式)から重力場 $\phi(x, y, z)$ を求めることができます。上記のボルツマン-ポアソン方程式にしたがって、空間+速度空間の6次元空間内で進化させることができれば究極のシミュレーションを遂行することになります。最近、私たちの研究グループは、筑波大学の共同研究者とともにこの目標へ向かって第一歩を踏み出しました。速度分布

関数を6次元位相空間上で直接積分することがついにできるようになったのです。筑波大学のスーパーコンピュータの10パーセント程度を借り切って、6次元空間を64の6乗の格子の上に切り、各格子点で速度分布関数が変化の様子を追うことができました。その結果を図4に示します。ダークマター粒子群の分布が空間、そして速度空間でも滑らかに表現できるようになりました。

6. まとめ

今後30年から50年というという長い期間で考えれば、あらゆる分野で計算手法もどんどん進歩し、コンピュータの進歩もあいまって、これまでできなかったシミュレーションが行えるようになるでしょう。私の予想では、コンピュータの進歩とともに計算そのものは実にシンプルで、例えば上記で紹介したように支配方程式系を直接積分するようなものに変貌していくと思います。重力に加えて流体力学や輻射輸送、化学反応、核反応をふくめた天体形成の詳細まで解像し、宇宙全体の進化の全貌を統一的に表現し、シミュレーションで進化を明らかにすることができるようになる日も近いでしょう。