

宇宙の構造形成シミュレーション

吉田直紀

〈名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: nyoshida@a.phys.nagoya-u.ac.jp

宇宙の構造形成の研究において、複雑かつ非線形な現象に対する理論モデルの発展のため、また理論予言と観測結果の直接比較を行うために大規模 N 体計算の果たしてきた役割は非常に大きい。現在では、標準モデルとして確立された冷たい暗黒物質モデルからの定量的な理論予言を行う際に宇宙論的シミュレーションの結果は不可欠のものとなっている。宇宙論の分野における N 体シミュレーションの進展について紹介する。

1. はじめに

—標準宇宙モデルの確立—

宇宙論は一つの転回期を迎えている。最近の宇宙マイクロ波背景放射の観測や銀河サーベイによる大規模構造解析の結果から、宇宙の構成要素や物質分布の基本統計量を記述する、いわゆる宇宙論パラメーターが決定され、暗黒エネルギーと冷たい暗黒物質（以下 Λ CDM）を二つの主な構成要素とする Λ CDM モデルが強く支持されている。長らく観測的宇宙論最大の課題であった宇宙論パラメーター決定が、驚くほどの精度をもって達成され、また宇宙初期の密度揺らぎの起源はインフレーションによるものとはほぼ裏づけられたことで、宇宙全体のダイナミクスや大規模構造の形成進化について信頼できる予言を与えることができるようになった。実際、 Λ CDM モデルは銀河団および大規模構造による重力レンズ効果や高赤方偏移のライマンアルファ雲の分布など、他のさまざまな観測結果とも整合し、今のところ、致命的な問題はないようである。暗黒要素の正体が不明なことが依然不愉快な問題として残っているものの、すでに余計なモデルのことを考える必要はなくなり、標準モデルの枠組の中でより重要なこと

に集中できるようになったと私は考える。特に私のように大規模数値計算を行う研究者にとっては、似たようなことを複数の宇宙モデルに対して行う必要がなくなり、歓迎すべきことであろう。（しかし逆に言えば、宇宙モデルを変えたシミュレーションで論文を書けたのは古き良き（？）時代となってしまった。）

本稿では過去 30 年の間の宇宙論的構造形成シミュレーションの進展と、その果たしてきた役割を紹介し、私が興味をもって行ってきた三つの事柄、大規模構造、ダークマターの性質、高赤方偏移での構造形成について最新の結果を紹介する。

2. 宇宙論的 N 体シミュレーション

宇宙の物質分布、あるいは銀河の分布を多くの質量粒子で表現し、重力多体問題を解いて系を進化させて宇宙の構造形成を再現する試みは、古くは Peebles¹⁾ や三好和憲と木原太郎²⁾ により 1970 年代初頭から行われていた。図 1 に各年代での代表的なシミュレーションと、それに使用された粒子数を示す。この図は必ずしも各時代での最大のものを示すわけではなく、また、さまざまな手法を用いたものが混じっている。 N 体シミュレーションを用いて構造形成に関して重要な知見を得

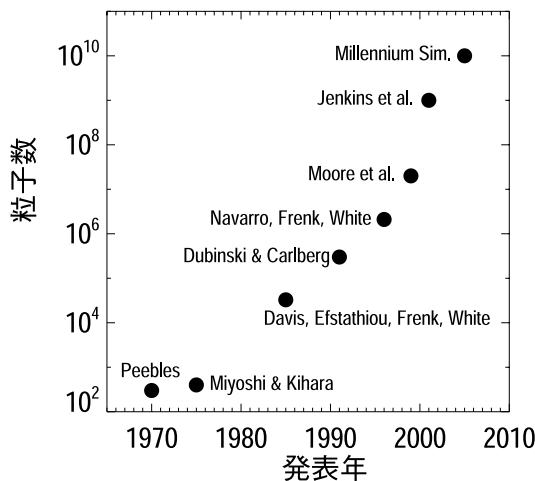


図1 構造形成 N 体シミュレーションの進化. 各年代での代表的なシミュレーションを、横軸に年代、縦軸に使用された粒子数として表す。

た(と私が判断する)ものをいくつか選んでいる。以下、その発展を年代に従って簡単に説明しよう。

1970年に Jim Peebles は銀河団の形成過程に着目し、300体の粒子(銀河)を用いた N 体計算を行った。髪の毛座銀河団のように、多くの銀河が集まって力学的にある程度緩和した系も、銀河間の重力相互作用により宇宙年齢の間に形成されることを示した。この論文の冒頭に“A cluster of galaxies is *imagined* to be a gravitationally bound system.”と書かれていることは印象的である。つまり、Peebles は、それまでただあいまいに想像されていた、重力相互作用により大規模構造形成が可能であるということを数値実験を用いて明確に示したわけである。Peebles ほどの研究者が何かを示すために N 体計算を使用したことは興味深い。

1975年に PASJ に発表された三好・木原の論文では、分布の特徴を記述する統計量である2点相関関数を導入し、銀河の分布を定量的に評価す

るという手法がとられた。彼らは400体の粒子を用いた系統的な N 体計算を行い、相関関数の形やその進化によって異なる宇宙モデルを比較することが可能であることを示した。この手法は30年以上経った現在でも銀河や銀河団分布の解析に必ず使われている。昨年、スローンサーベイから得られた銀河の相関関数から、宇宙初期のバリオン振動の痕跡が発見されたのは記憶に新しい。

1980年ころからダークマターの重要性に対する認識が高まり、1粒子=1銀河ではなく、粒子の分布はダークマターを含めた物質全体の分布であるとするシミュレーションが行われ始めた。そして、 N 体計算により再現された構造と、赤方偏移サーベイから得られた銀河の大域的分布との詳細な比較を行うようになったのは、1985年の Davis, Efstathiou, Frenk, White (DEFW) の論文³⁾からである。彼らは当時の高速計算機上で32,768個の粒子を用いて、いくつかのCDMモデルに対して大規模構造の形成のシミュレーションを行った。初期条件として、インフレーション理論の予言するほぼスケール不変な物質密度の揺らぎにCDM密度の揺らぎの進化を記述する関数を掛け合わせて得られる、現実的な物質分布を採用しており、与えられた宇宙モデルで物質分布の進化に対する理論予言を明確に示すことができた。また、銀河の分布と物質の分布は異なる(べきである)として「バイアス」という概念を導入し、銀河の空間分布や速度場の観測結果との整合性をさまざまな統計量を用いて議論した。その後、現在に至るまで20年以上にわたって宇宙論的シミュレーションを用いた宇宙大規模構造の研究の基本となっている*1。

1990年代に入って、30万體以上の粒子を用いた空間解像度の高い N 体シミュレーションが行われるようになった。John Dubinski と Ray Carlberg は1991年⁴⁾に、個々のダークハローに特化

*1 誤解をおそれずにあえて言えば、以降現在に至るまで、宇宙論的 N 体シミュレーションはほとんどすべて DEFW の亜流にすぎない。私自身も何とかこの亜流から抜け出さなくてはとつねづね思っているのだが……。

して解像度を高めたシミュレーションを行い、ハローの密度プロファイルは中心に向かって一定のべき則に従って発散することを発見した。そして、より大規模の宇宙論的シミュレーションを行い、この密度プロファイルを二つのべき法則の組み合わせとしてきっちりと定めたのが、Navarro, Frenk, White の 1995–1997 年の一連の論文⁵⁾である。彼らはさらに、その密度プロファイルは宇宙論パラメーターなどによらず、また銀河サイズから銀河団サイズまでさまざまな質量のハローに共通であることを示した。ダークハローの密度プロファイルの具体的な形、特に中心付近での勾配は、重力レンズや銀河の回転曲線などの観測と直接関係する重要な事柄である。そのため、その後複数の研究グループによる多くの研究が精力的に行われたが、得られた結果の食い違いから、いわば論争とでも呼べるような事態にもなった。このことについては天文月報 2005 年 11 月号の福重俊幸氏の記事を参照してほしい。なお、現在では福重氏らの提唱する、中心のべき指数は 1 よりやや大きいというものに収束しているようである。

さらに 1990 年代後半には、超並列 N 体計算により個々のダークハローを 100 万個以上の粒子で解像し、内部構造まで調べられるようになった。それほど高解像度のシミュレーションが行えるようになったのは計算機の能力の向上に負うところが大きいと考えられがちだが、実は、高解像度のシミュレーションのための初期条件を適切に与えられるようになったのが最大の理由である。大きな宇宙論的領域を保持しながら、必要な部分（例えばある一つのハローとその周辺部）のみに質量粒子を集中させる、階層的ズームイン法がこの頃に確立されたことで 100 万個の解像度が可能になったのである。福重氏の天文月報記事にもこの辺の苦勞が書かれている。Ben Moore⁶⁾ や Anatoly Klypin⁷⁾ はほぼ同時期に超高解像度の

CDM ハロー形成シミュレーションを行い、銀河団サイズと銀河サイズのハローの内部構造は相似、あるいはほとんど酷似しているということを示した。そして、今に至る「CDM モデルのサブハロー問題」を提起した。このことについては次々節に詳しく述べる。

密度プロファイルや部分構造の話は N 体シミュレーションが発見的方法として用いられたよい例である。数値計算が発見的方法として真に役立つのはその解が収束する場合であるが、上記の二つとも最終的には複数のグループによって確認されており、解そのものについては十分信頼がおける*2。またこのことは、「意義のあるシミュレーションとは」という重要な問題について一定の示唆を与えてくれる。

1990 年代後半になって、以下に書くように、より現実的な要請から、宇宙論的 N 体計算にも別の役割が求められるようになった。

3. 精密宇宙論 —観測 vs. 理論—

1990 年代末からは、2 degree Field 銀河サーベイや REFLEX 銀河団サーベイなどの大規模な観測の結果が得られ始め、銀河や銀河団の基本統計量（光度関数や 2 点相関関数）が極めてよい精度、ほとんどパーセントレベル、で得られるようになった。一方このころ、遠方超新星の観測から、宇宙の加速膨張が発見され、暗黒エネルギーを含めた Λ CDM モデルが標準として確立されつつあり、このモデルからのさまざまな諸量に対する定量的予言が観測と同程度の精度で求められるようになった。私が大学院で宇宙論の研究を始めたのもちょうどこの頃である。私はバルゴコンソーシアムという、主にドイツとイギリスの理論天文学者からなる研究組織に参加し、大規模並列 N 体計算を行おうとしていた。同コンソーシアムは、いくつかの有力な宇宙モデルに対して世界最大規模

*2 もちろんその解が現実の宇宙の現象と対応しているかどうかは別問題である。

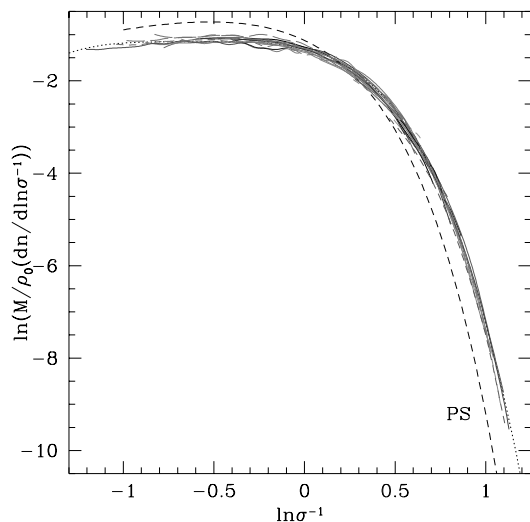


図2 ダークハローの質量関数. 横軸にはハロー質量の代わりに密度揺らぎのワースペクトルから得られる質量バリエーションを用いている. こうすれば, 複数の異なる宇宙モデル, 異なる時刻での結果がすべて, 点線で表すユニバーサル関数に乗ることがよくわかる. 破線は Press-Schechter 関数で, 大質量のハローの個数を大幅に少なく見積もっている.

の N 体計算を行い, 物質分布やダークハローの分布の統計量や質量関数などを文字どおり力ずくで決めてやろうという目標を掲げていた. このような, 一見非常にアメリカ的であるとも思える発想の研究がヨーロッパで行われたことは興味深い.

この計画の中で, 私は 1 億個と 10 億個の粒子を用いるシミュレーションを遂行することとなった. 後者は設定された計算領域の大きさから, 「ハッブルボリュームシミュレーション」と名づけられた, 当時世界最大の N 体計算である. これは私が初めて行った宇宙論的シミュレーションでもあるのだが, 1 大学院生がガーヒング (ドイツ) の計算センターの大型計算機をしばらく 100 パーセント占有して使用し, さらに光円錐データを作るためローカルディスクもすべて占拠することとなった. そのため普段同センターを使用していた

プラズマ物理や流体力学の研究者たちからは冷たい目で見られ, 気のせい何か肩身が狭かった. 毎週水曜に計算センター横の立派な芝生グラウンドで行われるサッカー練習には努めて参加して交流を図った. もっとも単に練習後のビールが楽しみだけだけの気もするが…….

このシミュレーションは 1999 年始めに完遂され, その最大の成果として, CDM モデルでの銀河団分布とその時間進化を精密に決定し, またダークハローの質量関数を表す極めて精度のよい関数形を得た⁸⁾. さらに後述するように, データを一般に公開してさまざまな研究に役立ててもらっている.

ハロー質量関数については, それまでは 1974 年に William Press と Paul Schechter⁹⁾ (という二人の偉い先生) が提案したいわゆる PS 関数が広く用いられていた. しかしこの関数形は, 質量の大きなハローの数を少なく見積ることが経験的に知られており, 広域銀河団サーベイの観測結果との比較のためには改良が必要であった. 我々は CDM モデルに特化し, 大小さまざまなシミュレーションを行うことで, 特に重要な, 大質量の領域でより精度が高い関数形を得た. 図 2 に得られた結果を示す. 質量関数は適切に定式化すれば, 宇宙論パラメーターなどによらず, 同じ関数形 (点線) で対応できることがわかる. 図には比較として PS 関数も破線で表示している. 直接 N 体計算の結果と合っていないことがわかる. 新たに提唱された質量関数は, 現在宇宙論のさまざまな研究に最もよく使われている.

一連の大規模シミュレーションのデータは公開されており, 現在でもマックスプランク研究所のホームページから自由にダウンロードできる^{*3)} ようになっている. 構造形成の N 体シミュレーションをこのようなアーカイブ形式で用いるのは新たな試みであったが, 幸い, 日本を含め世界中の天

*3 <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/index.shtml>.

文学・宇宙物理学者に理論的研究のため、また何らかの観測結果と比較するために利用していただいている。実際に、これらのシミュレーションのデータを用いて得られた成果はこれまでに計100編以上の論文として発表された。余談になるが、科学的成果以外にも、大規模構造の独特のパターンから何かを得るものがあったと教会美術家からお礼を言われたり、構造形成のムービーを舞台などの背景に流したいとの要求に答えたりと、十分な文化貢献(?)もしたと思う。

現在(2006年4月)の最大の宇宙論的 N 体計算は同じくバルゴコンソーシアムが行った、ミレニアムシミュレーション¹⁰⁾と呼ばれるもので、100億体の粒子を用いている。(ミレニアムどころかほんの数年後にはさらに大きな計算が行われるであろうが。図1参照。)ダークマターシミュレーションと銀河形成の準解析モデルを組み合わせ、銀河の進化や大域的分布、特に最近発見されたバリオン振動の痕跡の進化について調べている。

4. ダークマターの性質

先述したように、1990年代には、大規模構造形成の再現性から、CDMモデルが最有力候補として認識されていたが、最後の一揺れともいえる重大な問題提起がなされた。矮小銀河や低表面輝度銀河の回転曲線の観測からは、数値計算で示されたNFWプロファイルのような密度分布が支持されなかったこと(中心カスプの問題)と、MooreやKlypinらが行ったシミュレーションから得られた、銀河ハロー内のサブハローの数が、観測される局所銀河群内の矮小銀河の数よりも100倍程度も大きいというもの(サブハロー問題)であった。いずれも銀河サイズ以下の、宇宙論では比較的小さい長さスケールのことであったため、この当時、“Crisis on Small Scales”(小スケールでの難

局)として大きな話題となった。この問題を解決するために、大きく分けて二つの提案がなされた^{*4}。一つ目は、それまで理論や数値計算に直接取り入れられていなかった、星間ガスの運動や星形成過程によるフィードバックが及ぼす影響、いわゆる“baryonic physics”が重要であるというもので、二つ目はより極端に、ダークマターの素粒子的性質を変更すればよいというものであった。それぞれさらに具体的な、もっともらしいメカニズムが複数提案されていた。ただし、一つ目の解決策は、ダークマターに比べて圧倒的に量の少ないバリオンが、矮小/低表面輝度銀河のようなダークマター支配的な環境で影響を及ぼせそうにないということが問題である。また、二つ目は、素粒子物理学者を含め一部には支持者がいたものの^{*5}、これらの変更は標準的な基礎理論の枠組を外れるもので、非常に懐疑的な見方も多かった。

ちょうどその頃、私は共同研究者とともに並列 N 体流体計算コードの開発をしていたので、テストも兼ねた練習問題の一つとして高解像度の銀河団形成の数値シミュレーションを行い、銀河団ハローの密度分布と内部構造を詳細に研究した。一連の論文で、大規模数値計算の結果と強重力レンズの観測結果を統計的に比較することで暗黒物質の性質に制限を与えることができると提案した。実際に、先に述べた、ダークマターの性質に変更を加えた特別なモデルを取り上げて検証し、結果としてその可能性を否定した。簡単に言えば、最も単純なCDMが一番よいということをはっきりと示したのである¹¹⁾。我々のこの研究の後、CDMモデルの問題についての研究の主流はダークマターそのものから、銀河形成過程の詳細(上記の一つ目の解決策)を検討する方向へと進んだ。

この“Crisis on Small Scales”の現状について簡単に述べておく。サブハロー問題は、放射の影響

*4 もちろん、そもそも問題など存在せず、観測結果の解釈が間違っているという賢明な指摘は当時からあった。

*5 ちなみに私はこの一件以来、素粒子理論=どんな粒子でも可能、あるいはむしろ plausible といってよい寛容な分野、という印象を持った。あくまでも一部の人だけだとは思いますが……。

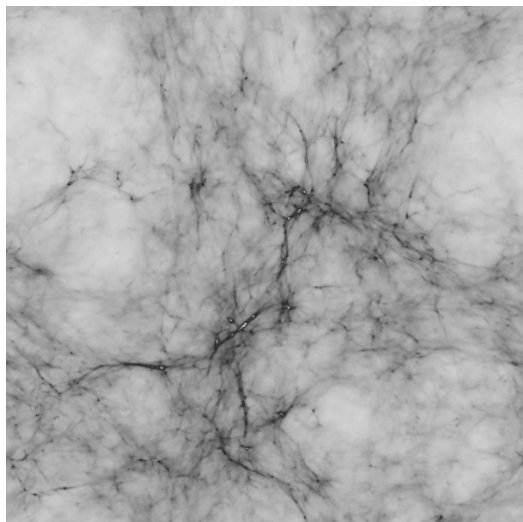


図3 宇宙初期での構造形成シミュレーション。1辺が0.86 Mpcの領域の $z=17$ でのガスの分布を示している。フィラメント状構造が交差する場所で始原分子ガス雲が形成されている。

により小さなハローの中での星形成が阻害されることで問題が解決されるようである。ここ2,3年の須佐元、梅村雅之両氏の一連の論文に詳しく議論されている。また、カスプ問題については、回転曲線の観測から密度プロファイルを求める際の仮定(球対称ハローなど)に問題があると考えられている。楕円体CDMハローの中でのガス雲の運動をより直接的に比較した場合、観測されるような緩やかな立ち上がりの回転曲線が得られる例も報告されており、こちらも「詳細なモデリング」により解決されそうである。これはしかし、個々の天体についてはただの各論になってしまい、健全とは言えるものの、私自身は「銀河の回転曲線からダークマターについて語れた時代はよかった」とやや寂しい感じをもちながら見ている。

5. 初代銀河の形成と宇宙の再電離

大学院で主に大規模構造形成の研究を行った後、ハーバード・スミソニアン天体物理学研究所

でポスドクとして研究を続けることになった。幸い、契約の際のちょっとした幸運と不運が重なって、向こう3年間全く好きなことを研究してよい(=特に何も期待されていない)ことになったので、「重要かつ面白い」テーマをゆっくり考えることとした。2001年の夏のことである。

私は今でもそうだが、究極的には銀河形成に興味があるため、銀河形成の重要問題とでもいえるような事柄にとりかかりたいと思った。しかし、それなりに一大分野で研究者の数も多いため、一人で始めるには主流の研究以外の何らかの新しいことをせざるをえないと判断した。そこで、そもそもCDMモデルでは銀河形成はいつから始まるか、という単純な観点から研究を始めることとした。特に意図したわけではないが、私は宇宙論→銀河形成→初代天体という流れに沿って研究してきたこととなる。

銀河形成の最小ユニットとは一体何なのか。これはCDMモデルのような階層的構造形成モデルの場合には、宇宙で最初にできる天体は何か、という問題に直結する。宇宙初期にできる「始原天体」あるいは「初代天体」については、実は古くから研究が行われており、日本の研究グループが中心的役割を果たしていた。(詳しくは大向一行氏の解説を参照してほしい。)ところが、個々の始原天体の形成過程についてはかなり理解が進んでいたものの、CDMモデルに基づいて宇宙論的シミュレーションを行い、星形成ガス雲の分布や構造形成との関連について研究したものはなかった。2003年に発表されたWMAP衛星の観測結果の影響もあって、今でこそ赤方偏移(z)10以上の星・銀河形成を対象とした研究は増えたが、私が始めた頃はこのような宇宙論的な観点で研究を行ったものはほとんどなく、単にプレス・シュヒター理論を $z > 10$ に適用して、ダークハローと星・銀河の数を対応させただけの数かぞえにすぎない研究が多かった。そこで私は共同研究者とともに、非平衡化学反応と放射冷却を取り入れた大

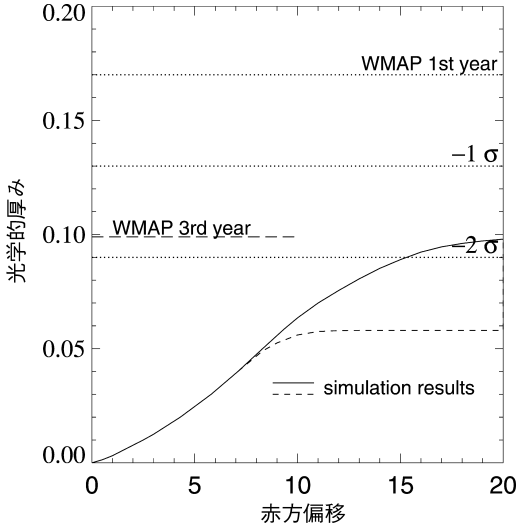


図4 初期構造形成の N 体流体シミュレーションと放射輸送計算を組合せて得られた、トムソン散乱による光学的厚み (τ_e) の進化. 実線と破線は、星形成率のモデル仮定が異なる二つの場合の結果を示す. WMAP 1年目(点線), 3年目(一点鎖線)のデータも示す.

規模な宇宙論的 N 体シミュレーションを行い、分子雲形成の条件を詳しく調べた¹²⁾. 図3にガス分布と分子雲分布を示す. さらに、 Λ CDMモデルにおいて、第一世代星形成ガス雲のホストハローの質量はおおよそ100万太陽質量程度、形成時期は赤方偏移20から30くらい、と特定した. シミュレーション結果の詳細な解析から、CDMモデルでも「ダークハロー=天体」ではない例(“ダーク”ダークハロー)があることを発見し、簡単な力学モデルを用いて、そのようなものがむしろ多数存在するというを示した.(もちろん存在したとしても $z > 10$ の話なので、残念ながら現在の観測天文学の範疇にはない.)

この研究の延長で、高赤方偏移での銀河形成のモデルを進展させたいとのんびりしていたのだが、WMAP衛星の観測結果が早期($z > 10$)の宇宙再電離を示唆した影響もあって、そうもしていられなくなった. また、全く論文を書き進めなかったため、周りからのプレッシャー(“publish

or perish”)も気にはなっていた. 私は早速、大学院生のAaron Sokasianとともに、初代天体を紫外光放射源とする宇宙再電離過程のシミュレーションを行った¹³⁾. 図4にその主要な結果を示す. これは、我々のシミュレーションから得られた、銀河間物質の電離度の進化と、その積分により得られる、宇宙マイクロ波背景放射に対する光学的厚み τ_e を示している. ハローからの紫外光脱出率等に対して常識的な仮定をすれば、 $\tau_e \sim 0.1$ 程度となり、WMAP衛星1年目の結果と合わない. シミュレーションの結果は 2σ の範囲内ようやく入る程度である. ところが、今年発表されたWMAP衛星の3年目のデータからは、1年目よりも大幅に小さい値、ちょうど $\tau_e \sim 0.1$ であることが判明した. 3年前から我々も正しく理論予言をしていたのである! と宣言したいところであるが、もちろん筆者らも、ちゃんと1年目の観測結果と合うように極端な仮定を導入したモデルについても計算していた. 若気の至りとしか言いがたない.

WMAP衛星の3年目のデータからは、再電離の時期として $z \sim 10$ が示唆される. 再電離の時期は、初代天体形成時期、ひいては宇宙初期での密度揺らぎの詳細と密接に関連しており、現在得られているような宇宙論パラメーター(特に小さい密度揺らぎの振幅)にのっとったモデルで $z = 7-10$ の間に再電離を起こせるかは不明である. 来年打ち上げ予定の欧州のPlanck衛星の結果からは積分値 τ_e がより精確に判明するだけではなく宇宙再電離の進化の様子まである程度わかるようになり、具体的にいつごろ、どのような天体が放射源となったのかにより具体的な示唆を与えると期待される.

6. 宇宙論的星形成へ向けて

—あと5桁—

最近の研究の進展についてこの節で簡単に紹介したい. 第一世代星形成のシミュレーションの先

行研究としては2002年にTom Abelらが行った、適合格子法を用いた高解像度のシミュレーションがある。彼らは始原ガス雲中の化学反応と放射冷却を取り入れ、小さなCDMハローの中心で重力収縮する分子ガス雲の進化の詳細を研究した。彼らの計算では分子ガス雲中心の密度がおおよそ $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ になるまでの進化を追っており、長らく最高解像度のシミュレーションとして有名であった。その先を正確に追うためには、ガス雲中心部の水素分子線に対するオパシティなど、さらに複雑な物理過程を取り入れた計算を行わなくてはならない。

私は大向一行氏（国立天文台）とともに、ガス雲が水素分子線に対して光学的に厚い場合のガスの冷却率を精度よく計算する手法を開発し、さら

に、水素分子の衝突誘起連続光放射による冷却を取り入れ、数密度にして 10^{16} cm^{-3} まで追う計算を行った¹⁴⁾。図5に宇宙論的設定の下で形成された原始星周辺的气体分布を示す。中心部ではおおよそ1天文単位程度の空間解像度を達成している。このような計算の場合、空間解像度あるいは質量解像度は計算スキームや計算機性能などにより制限されるのではなく、取り入れる基礎物理に制限されていたことを強調したい。我々のシミュレーションは先行研究よりも6桁ほど高い物理解像度をもつ。あと5桁で“stellar density”に到達する。

この3次元宇宙論的シミュレーションにより、高赤方偏移での始原星形成ガス雲の進化と構造がより詳細に解明された。特に重要な量である、原

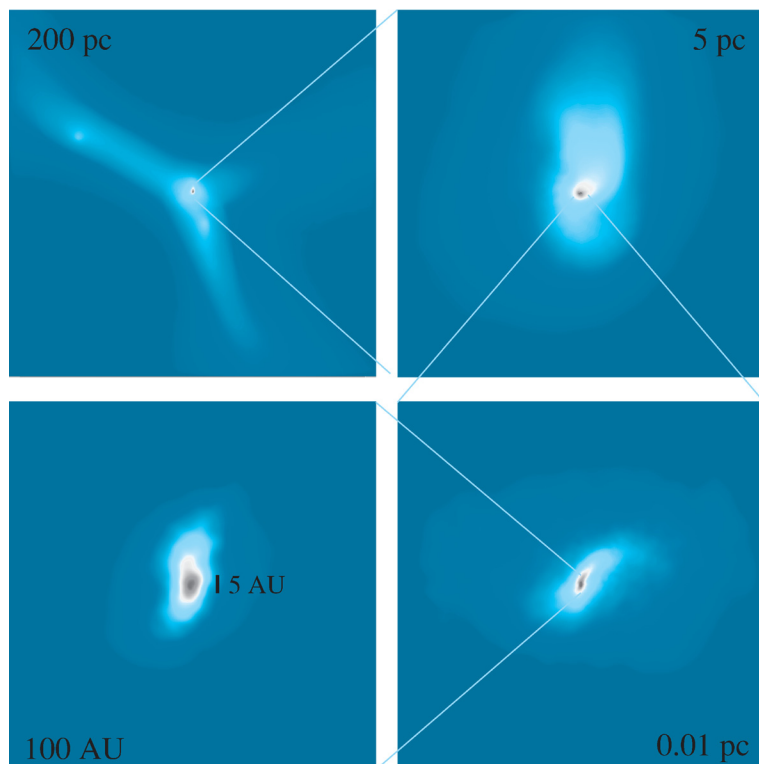


図5 第一世代星形成の宇宙論的シミュレーション。フィラメント状構造の交差部に存在する小ダークマターハローの中心に形成された原始星周辺的气体分布を表す。表示領域の一辺の長さをそれぞれパネル内に示す。最も拡大した左下図の中央部では、シミュレーションの解像度とガス雲コアのサイズ($\sim 5 \text{ A.U.}$)を比較している。

始星周りの密度、温度構造、および質量降着率を正しく計算できるようになった。今後は原始星形成進化の詳細をさらに研究したい。

7. 今後の課題

最後に、今後の宇宙論研究で、重要かつシミュレーションが大きな役割を果たすと期待される事柄を列挙し、まとめの代わりとしたい。

1. 暗黒物質はどのように分布しているのか。

バリオンはどう分布しているのか。そして銀河はどう分布しているのか。これらはなぜ同じ、あるいは異なるのか。

宇宙の中での異なる形態・状態の物質の分布の差異はバイアスの概念で簡潔に記述できる。このバイアスの起源は、構造形成と天体・銀河間物質進化の過程そのものにある。標準宇宙モデルの枠組みの中でこれらの分布を正しく再現できるかどうかは、われわれが天体形成や銀河間物質の進化にかかわる物理過程をすべて正しく理解しているかの重要な検証となる。宇宙の構成要素のおよそ4%ほどがわれわれのよく知るバリオン物質であるとされているが、実は現在の時点でその半分はどこにどのような形態で存在するかはわかっていない。何らかの観測でわれわれの近傍宇宙のどこかには残りのバリオン物質を発見することが重要である。一方、理論面では、現在の構造形成シミュレーションの延長で研究を推し進めることができるかと期待される。

2. 宇宙で最初にできた天体は何か。それらはいつ頃、どのように形成されたのか。銀河と呼べるものはいつできたのか。

初代天体の形成と銀河間物質の再電離の詳細についてはおそらくこの先10年の観測（電波からガンマ線に至るまで）からいっそう理解が深まるであろう。すでに、非常に高い赤方偏移においても低密度の銀河間物質中に重元素が発見されており、一方では、銀河系内にも金属量が極少の星が存在することが最近の観測からわかった。宇宙に

おける重元素の起源は重要問題の一つである。高赤方偏移での構造形成・銀河形成については観測結果が常に限られており、従来の現象論的記述アプローチを適用できない。むしろ「理論」天体物理学と数値シミュレーションの組合せが有効であるように思われるのだが、それは私の楽観論にすぎないのだろうか……。

3. 本当に Λ CDM モデルでよいのか。

この疑問には二つの意味をもたせている。 Λ CDM モデルが本当に詳細に至るまで正しいのか、という意味(これは上記の1とも関連する)と、われわれは、 Λ CDM モデルのように96%もの正体不明なものを含む理論で満足するか、という意味である。答えはほぼ自明で、暗黒エネルギー・物質の正体を明かすか、他のよりよいもので説明するしかないだろう。暗黒エネルギーについては、究極的には基礎物理からの裏づけが必要であるが、まずはそれがどのようなものであるかを天文学的観測から決定するのが最善であるとして、遠方超新星や銀河団の観測、高赤方偏移銀河サーベイなどの大規模観測計画が提案されている。遂行可能な観測を提案するためには、計画の段階から数値シミュレーションによる精度のよい定量的予言が不可欠である。宇宙の加速膨張を説明するために、暗黒エネルギーとは違う方向、たとえば重力理論の修正など、の解を探すことも価値があると思われる。ここでは N 体計算を用いた発見的方法が威力を発揮できるのではないだろうか。

謝 辞

一連の研究成果は、多くの共同研究者の方々の協力をもってなされたものです。これまでの共同研究者に感謝します。研究指導して下さった Simon White 教授、Lars Hernquist 教授、また名古屋大学で全く好きに研究させていただいた池内了教授、松原隆彦助教授に感謝いたします。最後に、受賞に対しまして、日本天文学会会員の皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Peebles, P. J. E., 1970, AJ 75, 13
- 2) Miyoshi K., Kihara T., 1975, PASJ 27, 333
- 3) Davis M., Efstathiou G., Frenk, C. S., White S. D. M., 1985, ApJ 292, 371
- 4) Dubinski J., Carlberg R., 1991, ApJ 378, 496
- 5) Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M., 1997, ApJ 490, 493
- 6) Moore B., et al., 1999, ApJ L524, 19
- 7) Klypin A. A., Gottlöber S., Kravtsov A. V., Khokhlov A. M., 1999, ApJ 516, 530
- 8) Jenkins A., Frenk C. S., White S. D. M., Colberg J., Cole S., Evrard A. E., Couchman H. M. P., Yoshida N., 2001, MNRAS 321, 372
- 9) Press W. H., Schechter P., 1974, ApJ 187, 425
- 10) Springel V., White S. D. M., Jenkins A., Frenk C. S., Yoshida N., et al., 2005, Nature 435, 629
- 11) Yoshida N., Springel V., White S. D. M., Tormen G., 2000, ApJ L544, 87
- 12) Yoshida N., Abel T., Hernquist L., Sugiyama N., 2003, ApJ 592, 645
- 13) Sokasian A., Yoshida N., Abel T., Hernquist L., Springel V., 2004, MNRAS 350, 47
- 14) Yoshida N., Omukai K., Hernquist L., Abel, T., 2006, astro-ph/0606106

Numerical Simulations of Structure Formation in the Universe

Naoki YOSHIDA

*Department of Physics, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa, Nagoya 464-8602, Japan*

Abstract: Over the past thirty years, N -body simulations have been used extensively to study the nonlinear growth of structure in the universe. Significant progress has been made in developing numerical methods, which has led to an improved understanding of galaxies and galaxy clusters. We review these advances. Results from state-of-the-art simulations are also presented.