論文の内容の要旨

Parallel N-body Method with Adaptive Mesh Refinement

(並列適合格子分割多体計算法)

氏名: 矢作　日出樹

現在、世界中では8m級の望遠鏡が稼動し、様様な銀河探査計画が進行または計画されている。今後人類は大量の観測データを得ることになるわけだが、近傍宇宙の観測量ならば自明な解釈を与えらるとができた観測量でも、深宇宙では常に選択効果の影が付きまとい、その解釈が恣意的なものになってしまう恐れがある。特に今まで銀河の形成と進化を定性的に理解する上で大いに役に立ってきた単純なモデルを用いる場合、その適用限界には注意を払う必要がある。では従来より客観的な解釈を与えるためにはどうしたらよいのか。観測データの定量的解釈を行っていくには今後はできる限り仮定を省いたモデル、つまり、大規模数値シュミレーションがもっとも強力な道具となることは間違いないであろう。

銀河の観測量にはたくさんあるのだが、なかでも我々が興味を持っているのは銀河の形態がどのようにしてできたのかという問題である。この問題は銀河天文学が幕を開けるとともに常に問われ続けられてきた問題であるにもかかわらず、未だにその明確な描像は得られていない。これは銀河形態が、銀河の環境、内部力学的構造、星形成史など、銀河より小さいスケールから大きいスケールの現象が複雑に絡み合って決定されるからである。この問題を銀河の分布から銀河の内部構造まで再現するシミュレーションを行うこと

によって解くために、私は質量分解能、重力分解能の双方に於いて高いダイナミックレンジを有する数値計算コードを開発することにした。

まず、銀河形態が判別できる計算をする為に必要な質量及び重力ダイナミックレンジを、シミュレーションで作られた銀河ハローの典型的な力学的緩和時間と銀河ハローの典型的な年齢を比較することにより見積もった。ここで、質量ダイナミックレンジというのは系全体の質量に対する粒子の質量の比を指し、粒子の質量が全て等しい場合は粒子数となる。一方、重力ダイナミックレンジとは系全体のスケールに対しての重力の計算が Newton 則に合う最も小さいスケールの比を表す。上記の見積もりから質量ダイナミックレンジは 10^9、重力ダイナミックレンジは 10^5 を実現する数値計算コードが必要であることが分かった。

そこで、まず Particle-Mesh(PM) 法を用いた計算コードを用いることを考慮したが、PM 法には大きな欠点がある。それは、重力ダイナミックレンジが小さいことである。PM 法を用いた典型的なシミュレーションでは使用する格子数と粒子数を同程度にする。この場合、粒子数が 10^9 なら、重力ダイナミックレンジは $\sim 10^3$ となる。この値は要求されている値より 2 桁も小さい。PM 法の重力ダイナミックレンジを上げる方法として Particle-Particle Particle-Mesh(P^3M) 法が今日広く使われている。P^3M 法では、ある粒子にかかる重力を近傍粒子からの力と遠方粒子からの力とに分離して、前者を直接総和法で、後者を PM 法で分けて解いている。しかし、ダークハローが形成され系全体の密度コントラストがあがってくると、近傍粒子間の直接総和計算部が近傍粒子数の自乗に比例して急速に増大するため、大きな密度コントラストを持つ系の計算を実行することが困難になる。よって、CDM モデルのように小さい質量スケールほど初期揺らぎが大きい場合、同じ粒子数でも計算領域が小さいものほど計算時間を要する。

このような問題をすべて克服しているのが Adaptive mesh refinement(AMR) を用いた PM 法である。PM 法の重力分解能、即ち、r^{-2} 則に合う最も小さいスケール、は PM 法で用いられる格子間隔によって決まっている。PM 法ではこの格子は等間隔の立方格子である。しかし、AMR を用いれば、より高い重力分解能が要求される領域に対し局所的に細かい格子を配置することによって、高い重力ダイナミックレンジを得ることができる。更に、各粒子の軌道計算の時間発展の間隔を各粒子が属する格子間隔に比例する形で変化させることによって、格子を空間的に分割するだけでなく時間方向にも分割することができる。私はこの AMR を用いた PM コードを開発するとともに、種々のテストを繰り返すことによって、このコードが高い重力ダイナミックレンジをもつことを示した。

一方、N 体コードではダークマター成分の時間発展を追うことができるのだが、直接的に観測されるのはガス成分とそれから生じる星の成分である。その為、数値シミュレーションで直接的に観測データと比較するためには、N

体コードと数値流体コードを組み合わせる必要がある。このAMRを用いたN体コードには自然にEuler的な数値流体コードを取り込むことができる。Euler的な数値流体法はPM法と同様に格子間隔で分解能が決まってしまうのだが、AMRを使うことによって局所的に分解能をあげることができる。また、N体成分と流体成分の重力計算は同時に解くことが可能であるAMRを用いたEuler的コードは天文以外の分野も含め様々な分野で開発が行われているが、AMRを宇宙論的な問題に用いた数値シミュレーションコードは未だ少ない。我々は2次のGodunov法に基づいたEuler的な数値流体コードにAMRを施したコードを開発した。

流体計算コードの完成に先立ち、現在はN体コードの計算結果の解析も進めている。まず、シミュレーションの結果から銀河団や銀河のダークハローを抽出するハロー探索のコードを作成した。このコードではFriends-of-friends法を用いている。また、ハロー探索を各時刻でのN体シミュレーションの出力結果に用い、ある時刻とその前の時刻でのハローの同定を行うと、現在の、即ち$z=0$でのダークハローがどのような合体を経て今日に至ったかを示すマージングツリーと呼ばれる樹状図を作ることができる。このマージングツリーを用いると銀河形成の準解析的モデルを通して、本来質量分布しか表していないN体計算の計算結果に、実際の銀河の各種パラメータを空間分布とともに付与することができるようになる。これは即ち、数値的な銀河カタログを作成できるということである。このような数値銀河カタログは今後の深宇宙探査、広域探査、赤方偏移探査といった観測データを解釈するうえで基本的なデータになると考えられる。

2001年1月より国立天文台ではベクトル並列型計算機VPP5000を中心とした新スーパーコンピューターシステムが稼動し始めた。この計算機の性能を十分に発揮するためには上で述べたAMRコードをベクトル化しなければならない。AMRコードはループ内でアクセスされるデータの種類から次の三つに分類される。即ち、粒子ループ、格子ループ、粒子-格子ループである。このうち、粒子ループと格子ループのベクトル化は容易であるが、粒子-格子ループのベクトル化には工夫を要する。まず、同じ格子に入っている粒子は連結リストでつながっているが、粒子-格子ループにおいてこれを一つ一つ手繰ってしまうと(深さ優先走査)ベクトル化できないのだが、これを幅優先走査に変換することによってベクトル化することができた。また、粒子の質量を格子に付与する個所は従来ベクトル化することができないと考えられていたが、上記の走査順序変換に加えループ分割を行うとベクトル化することができることを示した。

更にスーパーコンピュータの性能を引き出すにはベクトル化に加え並列化を行う必要がある。その為には各階層毎に各プロセッサでの負荷が均等になるような格子分配を実装した。分割をする際はMorton順序と呼ばれる方法で格子を並べ替え、整列された格子を各プロセッサに配分する。こうすると

あるプロセッサの担当する格子が比較的集まるように分配することができる。これらに加え、階層間通信、同一階層間通信、粒子-格子間通信を実装し、世界初の AMR を用いた N 体コードの分散並列コードは完成した。

我々はこのコードを用いて銀河団の形成シミュレーションを行った。その結果、粒子の分布は他のグループの計算結果とおよそ一致するのだが、銀河団ハローの中心付近での力学構造が顕著に異なる結果となった。我々のコードは他のグループと比べ時間分解能が 1,2 桁高くなっている。そこで、我々は改めて時間分解能の低い計算を行ったが、こちらは他のグループの結果と一致した。このことは、宇宙論的シミュレーションにおいて、ダークハローの力学構造を精密に計算するためには従来よりも短い時間刻みで計算しなければならないことを示唆している。

我々は AMR を用いた宇宙論的シミュレーションコードの開発を行った。このコードは　期待通りの性能を出しており、今後はこのコードを用いて数値銀河カタログを作成し、実際の観測データと比較をしながら、銀河生誕の秘密を解き明かしていきたいと考えている。