

論文審査の結果の要旨

氏名 矢 作 日出樹

本論文は、宇宙論的な構造形成の数値シミュレーションのための新しい高速な計算アルゴリズムを提案し、さらに国立天文台の並列ベクトル型計算機 VPP-5000 上に実装し、計算精度・速度を従来の計算コードと比較したものである。宇宙論的な初期ゆらぎからの重力不安定による構造形成の研究、特に銀河や銀河団の分布や構造の観測との比較のためには構造形成の非線形段階を追跡できる数値シミュレーションが有効なツールになる。CDM 宇宙論の元では重力場は無衝突物質とみなせるダークマターに支配されているので、基本的な構造形成を追うためにはダークマターのみによるいわゆる N 体シミュレーションを行えばよい。しかし、銀河、銀河団の観測と比較するには準解析的なモデルと組み合わせてダークハローを銀河と解釈しなおすか、あるいはバリオンの進化を流体力学を解いて計算し、さらに輻射輸送や星形成過程をモデル化することで銀河の観測可能な構造、光度、スペクトル等の情報をシミュレーションから直接に引き出す必要がある。本論文で提案される計算法はこのうち後者の方向を目指すものである。

従来、このような宇宙論的 N 体、あるいは N 体+流体のシミュレーションには基本的には2種の方法が使われてきた。一つは重力ポテンシャルは規則格子上で解くものである。この場合にはソルバーとして FFT が利用でき、極めて高速な計算が行える。しかし、空間分解能が格子サイズに制限されるため、宇宙膨張から切り離された銀河等構造の発展を追跡するのは困難であるという大きな欠点がある。格子サイズ以下は粒子間重力を直接計算することで分解能を上げる方法もあるが、この場合には空間構造が発達し高密度領域ができると計算時間が急激に増大する。もうひとつはツリー法である。この場合には、分割を適応的に行うことで空間構造が発達した場合でも大きな計算時間の増大はないが、そのかわりそもそも一様に近い場合でも計算量が多い。

本論文で提案される方法は、ツリー法のような再帰的な空間分割を行いながらもポアソン方程式は格子上で解くことで高速な計算コードを実現したものである。

本論文は4章からなっている。第1章では、FFT、ツリー法などの従来の計算方法が概観され、本研究のアプローチが述べられる。

第2章では計算スキームの詳細が述べられる。適応格子を使う計算法自体は本論文が初めてというわけではないが、従来の方法のほとんどは基本格子中の高密度領域と同定された領域を覆う直方体領域を再分割するものであった。本論文では、基本的には各メッシュ毎に

他とは独立に分割する (あるいは分割をやめて上のレベルに戻す) かどうかを決定する。分割の基準は単に1メッシュ内の粒子数が設定した限界値を超えるかどうかである。このために、特別な手続きを必要としないで自動的に空間構造の変化に対応して動的に格子構造が変化する。ポアソン方程式はFFTではなくマルチグリッドを使って解く。メッシュサイズが変わる境界では、外側のメッシュで値を内挿することで小さいメッシュのために必要な境界条件を与える。さらに、メッシュサイズ毎に違う時間刻みを採用する階層的時間刻みについても新しい方法が考案されている。

第3章では、ベクトル化および並列化の方法と、テスト計算による速度・精度評価についてまとめられている。本論文では、再帰的な複雑なデータ構造を採用しているにもかかわらず、計算量の多い各所で巧妙なアルゴリズムの書き換えを行うことで極めて高いベクトル化効率を実現されている。また、並列化については分割レベル毎に別の空間分割を行うことで粒子系のシミュレーションで並列効率を制限する主な要因となることが多いロードバランスの不均衡を回避できている。このような新しいアプローチをとった結果、実現された計算速度は非常に優れたものである。VPP5000 単一プロセッサでの速度が35万粒子/秒であり、文献にあるなかでこれを上回るのは3000プロセッサを超えるASCI Redを使ったツリー法の計算のみである。計算機をLinpackベンチマークでの速度を使って規格化した比較では、ツリー法および他の適応格子の実装に比べて10倍ないし100倍高速という結果が得られており、これは非常に高く評価できるものである。並列化効率についても利用できたCPU台数の範囲で満足できる結果がえられている。

最後に、サンタバーバラ クラスタ比較プロジェクトにのっとった計算をすることで他のコードの計算結果との比較を行っている。時間刻み一定の場合についてはよい一致が得られており、コードの正当性は確認されたと判断できる。

第4章は結論であり、主に今後の展望がまとめられている。

以上要約するに、本論文は宇宙論的 N 体計算のための適応格子を使った新しい計算アルゴリズムをベクトル並列計算機上に実装し、従来の計算コードに比べて画期的な高速化を実現したものである。今後この計算コードを使うことで従来は不可能であった大粒子数のシミュレーションが可能になり、大規模構造の形成から銀河形成までを同時に解くことで観測との精密な比較が可能になると期待できる。本論文の一部は吉井譲および森正夫との共同研究であるが、論文提出者が主体となってアルゴリズム開発及び実装・検証を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断できる。したがって、委員会は全員一致で本論文提出者に博士(理学)の学位を授与できると認める。