

## 審査の結果の要旨

論文提出者 似鳥 啓吾

高密度恒星系は恒星どうしの近接衝突(大角散乱)が頻繁におこる系として特徴づけられる。このような衝突系の進化の数値シミュレーションは、粒子(恒星)の軌道を正確に積分する必要があること、そのために粒子ごとに時間積分のきざみを決める必要があるなど、無衝突恒星系の進化シミュレーションの数値手法とは大きな違いがある。論文提出者は、高密度恒星系の数値シミュレーションを大幅に加速するための3つの新しい手法を提案した。

本論文は4章からなる。論文は、共著者との連名ですでに出版あるいは出版予定であるが、そのすべてが論文提出者の似鳥啓吾が筆頭著者であるだけでなく、彼の主導で研究が進められたものであることを論文審査において確認した。なお、その論文の内容を主論文のなかを含めることについては、共著者の承諾書が得られている。

本論文第1章は序論であり、研究の背景や従来の研究の問題点をまとめ、本研究の目的と意義、およびその概観を述べている。

第2章では、高密度恒星系の $N$ 体シミュレーションを効率的に行うために、論文提出者が提案した6次精度エルミート積分法および8次精度エルミート積分法について述べられている。この積分法の特徴は、今までこの分野のスタンダードとして使われて来た4次精度エルミート積分法に対し、1ステップあたりの計算量は、6次精度エルミート積分法では約1.5倍、8次精度エルミート積分法では約2倍に増えるものの、1ステップあたりの時間きざみ幅をそれぞれ、1.5倍以上、2倍以上とることができれば、実計算時間は大幅に短縮できることである。論文提出者は、実際の系にこれらの手法を応用し、実計算時間において、2倍程度の短縮をはかれることを実証した。また、全エネルギーを $10^{-8}$ の精度で保存させなければならないような系においては6次精度エルミート法が、また、 $10^{-11}$ の精度で保存させなければならないような系においては8次精度エルミート法が非常に有利であることも示した。この研究成果はすでに発表されており、この手法を使った計算も実際に行われていて、実計算時間の大幅な短縮に貢献している。すでにこの手法が高密度恒星系の進化計算に大きな寄与をしていることから、その成果は高く評価できる。

第3章では、高密度恒星系の進化シミュレーションに必要な粒子ごとの独立時間きざみ法の並列計算の新しい手法について述べられている。重力計算においては、重力を受ける粒子を $i$ 粒子とし、重力を及ぼす粒子を $j$ 粒子とする場合に、重力計算の並列化を、 $i$ 粒子について行うか、 $j$ 粒子について行うかを、それぞれ、 $i$ 並列、 $j$ 並列として区別する。これまで行われて来た並列化は、どちらか一方に関してのみの、1次元並列化がほとんどであった。1次元並列化の場合には、プロセッサの数を $p$ とすると、プロセッサあたりの重力の計算量が $O(N^2/p)$ となるのに対し、プロセッサ間の通信量が $O(N)$ となるので、結局のところ与えられた問題の粒子数が有効なプロセッサ数を決めてしまう。これに対して、2次元アルゴリズムは、 $i$ と $j$ の両方の並列度を同時に用いることで、プロセッサ間の通信量を $O(N/\sqrt{p})$ まで軽減できる。論文提出者は、 $i$ と $j$ の両方に任意のプロセッサ数を割り当てることと、各粒子は独立時間きざみでありながら、十分均等に負

荷分散が達成されるアルゴリズムを開発し、その有効性を実際の大規模並列計算機上の数値シミュレーションにおいて実証した。この成果が今後大規模並列計算機上で大いに使われて、この分野の発展に寄与すると期待される。

第4章では、最近大いにその性能をあげてきたSIMDハードウェアの一種であるグラフィック描画専用プロセッサ (GPU) を高密度恒星系の進化計算に使うために、論文提出者が新しく開発した専用計算ライブラリについて述べられている。これらの汎用GPUの弱点は、単精度浮動小数点計算については、非常に高い性能を持つものの、高精度の計算が必要とされる高密度恒星系の進化計算に必要な、倍精度浮動小数点計算の能力は10分の1以下と低くなってしまふことである。論文提出者は、2ワードの単精度浮動小数点数を使うことにより、倍精度と同じような計算精度を達成できる手法を開発し、その実用性を実際の数値計算において実証した。特に、市販の安価なグラフィックボードを用いて、専用計算機GRAPE-6Aを凌駕するような計算性能を達成したことは、高く評価できる。

最後の章は、6次および8次精度エルミート積分法に関する詳細を述べたAppendixである。

論文提出者は高密度恒星系の進化シミュレーション用に、新しく3つの手法を開発し、実用的な計算においてその有効性を実証した。また、その一部はすでに他でも使われ、この分野の発展に貢献している。これらの結果は高密度恒星系の進化シミュレーションを大きく進展させる画期的なものである。

以上を要するに、本論文は恒星系天文学の分野において、新しい知見をもたらすとともに、新しい発展の可能性を開くものである。よって本論文は博士(理学)の学位論文としてふさわしいものであると、審査委員会は認める。