

氏 名 押野 翔一

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1408 号

学位授与の日付 平成 23 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Particle-Particle Particle-Tree : A Direct-Tree Hybrid  
Scheme for Collisional  $N$ -Body Simulations

論文審査委員 主 査 教授 福島 登志夫  
准教授 小久保 英一郎  
教授 吉田 春夫  
准教授 吉川 真  
教授 井田 茂 東京工業大学

## 論文内容の要旨

The  $N$ -body simulation is a simulation of motions of particles under the Newton's Law of Gravity.  $N$ -body simulations have been used for evolution of dynamical systems. For example,  $N$ -body simulations are used for the formation and evolution of structures in the Universe. These cosmological  $N$ -body simulations are using the cold dark matter model and reconstruct observed large-scale structures.  $N$ -body simulations are also used for dynamics of the Galaxy as well as the formations of various structures of galaxies such as the spiral structure, evolutions after collision between galaxies and stellar motion in each region of galaxies. Globular clusters are the system that contains about  $10^6$  stars with high central stellar densities and tend to be round. One of problems of Globular clusters is to remain such dense stellar system for a long time.  $N$ -body simulations confirmed the gravothermal oscillation (Bettwieser & Sugimoto, 1983; Makino, 1996) which is the solution of this problem. In planet formation, accretion between planetesimals to be protoplanet is gravity dominant phase.  $N$ -body simulations discover the oligarchic growth (Kokubo & Ida, 1996) in this phase. Dynamical systems can be divided as two parts by using the relaxation time. The two body relaxation redistributes energy to be equilibrium state by close encounters. The relaxation time is the time that dynamical systems become equilibrium state by two body relaxation. Collisionless systems are the system that of relaxation time is larger than its life time and collisional systems are the system that of relaxation time is shorter than its life time. Therefore, close encounters are important for collisional systems. In collisionless  $N$ -body simulations, there are many schemes to treat large number of particles. For example, the particle-mesh (PM) scheme (Hockney & Eastwood, 1981), the particle-particle particle-mesh (P3M) scheme (Hockney & Eastwood, 1981), the tree method (Barnes & Hut, 1986) and combinations of PM and tree (TreePM) scheme (Xu, 1995; Bagla, 2002; Dubinski et al., 2004; Springel, 2005; Yoshikawa & Fukushige, 2005; Ishiyama et al., 2009) are used. These schemes are powerful and useful for collisionless systems such as dynamics of galaxies and large scale structure of universe.

Collisional systems, however, difficult to treat large number of particles. For the time integration of collisional  $N$ -body systems such as star clusters and systems of planetesimals, the combination of direct summation for force calculation and the individual time step algorithm has been the standard method for nearly half century (Aarseth, 1963, 2003). It is important that integrating close encounters accurately when treating collisional systems. Therefore, the individual time step algorithm has been used for calculating collisional systems. It is not impossible to combine individual time step algorithm and fast and approximate force calculation. For example, McMillan & Aarseth (1993) developed a high-order integrator using individual time step combined with the tree algorithm. However, in previous studies it was difficult to achieve good performance on distributed-memory parallel computers for such scheme. The BRIDGE scheme is one of a solution for this problem. This scheme uses the tree and the individual time step algorithm. The BRIDGE scheme can use for motions of globular clusters in a galaxy. The BRIDGE scheme, however, specialized for that problem, it cannot use for other collisional systems. In this Ph.D. thesis, we present a new hybrid algorithm for the time integration of general collisional  $N$ -body systems. In this algorithm, gravitational force between two particles is divided into short-range and long-range terms, using a distance-dependent cutoff function. The long-range interaction is calculated using the tree algorithm and integrated with the constant-time step leapfrog integrator. The short-range term is calculated directly and integrated with the high-order Hermite scheme. We can reduce the calculation cost per orbital period from  $O(N^2)$  to  $O(N \log N)$ , without significantly increasing the long-term integration error. The results of our test simulations show that close encounters are integrated accurately. Long-term errors of the total energy show random-walk, because it is dominated by the error caused by tree approximation, the forces due close encounters are calculated directly and that the orbits are integrated with the high-order scheme.

## 博士論文の審査結果の要旨

宇宙物理、惑星科学の様々な問題は重力  $N$  体系として扱うことができるが、星団の進化、惑星形成過程、銀河中心の恒星系進化等、その多くは衝突系であり 2 体緩和によって系が進化する。これまで無衝突系シミュレーションではツリー法・高速多重極法・並列化などの組合せにより  $N > 100$  億の計算例もあるが、衝突系のシミュレーションでは、近接遭遇を正確にかつ効率よく扱うための独立時間刻み法や高次精度積分スキームとツリー法などの技法を組合せることが困難であり、 $N$  は数十万程度であった。この現状を打破すべく、本論文では、惑星形成など少数系の長時間積分において近接遭遇を扱えるように開発された Chambers のハイブリッド法をベースに、遠距離相互作用はツリー法で効果的に近似する一方、近接遭遇は 4 次エルミート公式と独立時間刻みの組合せで精度よく計算する Particle-Particle Particle-Tree (PPPT) 法を新しく開発し、計算精度、計算量等に関する数値実験を通してその実用性を示している。

論文全体は 5 章からなる。第 1 章はイントロダクションであり、従来の計算法が概観されている。第 2 章では、PPPT スキームに直接関係する先行研究である MVS (混合変数シンプレクティック) 積分法、ハイブリッド法などがまとめられている。第 3 章は本論文の中心となる章であり、PPPT スキームの原理および実装の詳細が述べられている。基本的なアイデアは、ハイブリッド法と同じく粒子間の重力相互作用を 切替関数と呼ばれる距離の滑らかな関数によって近距離成分と遠距離成分に分割することである。これをハミルトニアン分割と考え、遠距離成分については通常のリープログ法を使い、近距離成分については 4 次エルミート法と独立時間刻みの組合せを用いる一方、惑星系で問題になる太陽重力については近距離成分と同様に 4 次エルミート公式で積分する。第 4 章ではテスト計算の結果がまとめられている。切替関数の切替距離などの本積分スキームに固有な計算パラメータ等の最適範囲について詳細に調べられている。また、長時間計算ではエネルギーなど保存量の誤差がランダムにしか成長しない一方、計算時間が  $N \log N$  で増加するなどが示されている。この結果、 $N = 10$  万の場合で計算量を約 3 ケタ減らすことに成功しており、従来全く不可能であった 100 万を超える粒子数での惑星形成シミュレーションが可能になったと結論されている。

$N$  体衝突系のシミュレーションにおいて画期的な計算法となるであろう PPPT を提案し、その有用性を実証した本研究の意義は高く評価される。また、アルゴリズムの考案から実装、数値実験、結果の取りまとめ、議論など、論文作成の一連の過程において、出願者が主体的に行っていることが認められる。これにより審査委員会は、全員一致で本論文が博士論文として十分な価値を有し、合格であると判定した。なお、この研究の一部は、申請者を筆頭著者とする学術論文として *Publications of the Astronomical Society of Japan* 誌に投稿済みである。