S604

専用計算機による大規模シミュレーション — GRAPE を例として

Large-scale Simulation on Special-purpose Computers — The GRAPE Project

牧野淳一郎
東大理
MAKINO Junichiro
Tokyo Univ.

GRAPE プロジェクトの歴史と現状、将来の展望を概説する。 GRAPE プロジェクトは、天体物理学における重力多体問題シミュレーションを専用計算機によって加速することにより、汎用並列計算機では現実的に不可能であった種類の研究を可能にすることを目標とする。

重力多体系は、お互いの重力だけで相互作用する質点粒子からなる系である。太陽系から銀河、銀河団、宇宙の大規模構造にいたる、様々な構造は第一近似としては重力多体系として記述できる。粒子数が 3 以上の場合には解析的な一般解は存在しないため、重力多体系の振る舞いの理解には数値シミュレーションが本質的な役割を果たしてきた。

重力多体系シミュレーションは、方程式の上ではプラズマの粒子シミュレーションとほとんど同じである。違いは粒子間相互作用が静電ポテンシャルではなく重力であることであり、このために電荷の正負に当たるものが存在せず全ての粒子間相互作用が引力になる。もうひとつの違いは、プラズマに比べて関係する粒子数がはるかに少ないことである。銀河でも恒星の数は 10^{11} 程度であり、球状星団や惑星形成過程では粒子数は 10^5 程度になる。この 2 つの違いは、物理的にはデバイ遮蔽が存在しない (形式的にはデバイ長が系のサイズ程度になる) ことと、2 体緩和のタイムスケールが我々の興味がある時間スケール (多くの場合に宇宙年齢) に比べて短いことを意味する。

数値シミュレーションへの要求としては、10^5 程度と比較的小さな粒子数で、高い精度で粒子間相互作用を計算できる必要があり、また、粒子毎に軌道運動のタイムスケールが大きく変わるために、粒子毎に独立に時間ステップを変えることが必要になる。特に高い精度が必要なために、ツリーや FMM のような近似的方法で加速することは難しく、直接に全粒子間の相互作用を計算する方法が有効である。

GRAPE (GRAvity piPE の略) プロジェクトは、以上の考察から天体物理における重力多体シミュレーションのうち粒子間相互作用の計算の部分だけを専用ハードウェアで加速することを目標にしてきた。基本的なハードウェアの構造は、粒子間相互作用の計算に専用化されたパイプラインプロセッサである。すなわち、粒子間重力の計算手順に従って演算器を並べてプロセッサを構成することで、プログラムなしで多数の演算器を常時並列動作させている。さらに、多数のパイプラインプロセッサを使って、複数の粒子から複数の粒子への力を並列に計算させることで高い性能を実現している。

最初の GRAPE ハードウェアである GRAPE-1 は 1989 年に完成した。ピーク速度は 120 Mflops であった。現在の最新のシステムである GRAPE-6 は 2002 年に完成し、そのピーク速度は 64 Tflops と最高速の汎用並列計算機である地球シミュレータを上回るが、開発コストはほぼ 1/100 である。 GRAPE は現在東京大学以外にも国立天文台を始めとする国内外の数十の研究機関で使われており、惑星形成、星団の進化、銀河形成等の多様な分野で大きな成果を上げてきている。

GRAPE は専用化により優れた価格性能比を実現できたが、あらゆる数値シミュレーションで常に専用ハードウェアが優れているわけではない。講演では GRAPE が成功を収めてきた理由について考察すると共に、今年度から始まった次世代 GRAPE の開発プロジェクトである GRAPE-DR プロジェクトについてその基本的な思想と開発の方向をまとめる。目標性能は 2 Pflops、完成は 2008 年度を予定している。 GRAPE-DR では専用化されたパイプラインプロセッサを使わないことで、これまでの GRAPE では扱えなかった多様なアプリケーションに対して高い性能を実現することを目指す。この意味で、「専用計算機」からは大きな方針の転換になる。