国立天文台天文シミュレーションプロジェクト成果報告書

Vlasov-Maxwell コードの並列化

鈴木昭宏 (国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト)

利用カテゴリ　XT4C ・ 汎用 PC

宇宙空間には至る所に無衝突プラズマ (粒子間の相互作用が無視できるほど希薄なプラズマ) が存在し、様々な天体現象で重要な役割を担っている。特にこのようなプラズマの振る舞いを知るには、物理空間だけでなく、速度空間の情報も合わせた位相空間中の構成粒子の分布の時間発展を追うことが必要となる。

現在、無衝突プラズマのシミュレーションで主流となっている計算手法は Particle in cell(PIC) と呼ばれる、粒子法の一種である。しかし、近年になって、位相空間中での粒子の分布関数の時間発展を記述する Vlasov 方程式の数値積分が試みられるようになってきた。この手法を用いれば、粒子が少ない領域も多い領域も同じ精度で解くことができる。しかしながら、問題点もある。計算手法自体は数々の研究者によって考えられてきたものの、この手法は運動量の空間まで含めた位相空間を離散化するため、計算機への負荷が大きい。そのため、最近まで物理的に意味のあるシミュレーションはなかなか行われてこなかったが、近年の計算機の発展によりある程度の計算が可能になってきた。

本申請課題では、Vlasov コードの並列化や高精度化を目的として、XT4, 中規模サーバ, 汎用 PC を用いた計算を行なってきた。2012 年度に実施した課題として以下の 2 点を挙げる。

1. Vlasov simulation の並列化

   2012 年度の申請課題では XT4-C カテゴリ (最大同時実行コア数 32) に採用され、コードの並列化作業を行った上で計算速度がどれほど向上するのかを調べた。コードを並列化した後に、これまでに 1 コアで行なっていた weibel 不安定性というプラズマ不安定の数値計算を行い、1 コアでの結果と 32 コアの結果が一致することを確かめた。並列化の効率を定量的に調べるために、32 コアと 64 コア (いずれも XT4 の debug キューを使用) での 10 ステップの計算を行ない、計算に要した時間の計測から並列化効率 98% という値を得た (ストロングスケーリング)。

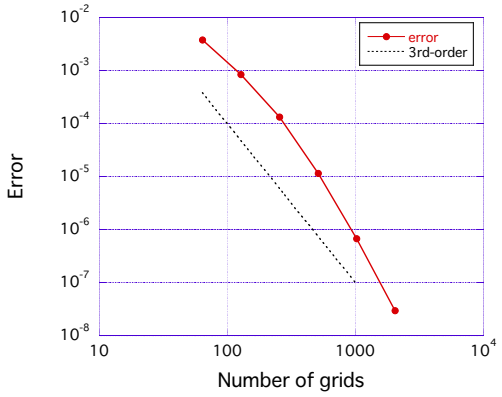

図 1: CWENO スキームで 1 次元線形移流方程式を解いたときのエラー

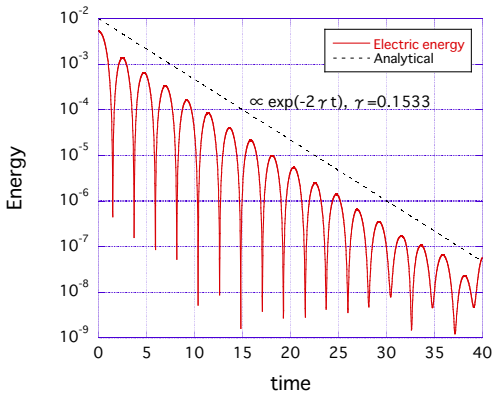

図 2: ランダウ減衰の計算結果

2. 高精度移流スキームの実装

課題 1 のコードは 1 次精度であり、数値拡散の影響を大きく受けてしまう。より精密な数値計算を行なう目的で、コードを高次精度に拡張する研究を行った。Vlasov equation は移流方程式に分類され、既存の移流方程式を解くスキームを利用できると考えた。3 次精度の Central Weighted Essentially Non-Oscillating(CWENO) スキーム を実装し、Vlasov コードへの応用を行なっている。図 1 は、最も簡単な 1 次元線形移流方程式を CWENO スキームで解いた場合の数値解のエラーをグリッドの数の関数として表したものである。エラーがグリッドの数の 3 乗以下で少なくなるのが見て取れる。また、CWENO スキームを 2 次元静電 Vlasov コードに実装し、テスト問題として、ランダウ減衰という物理過程を計算した。図 2 に静電エネルギーの時間変化を示す。点線は線形解析から得られる減衰率を表し、数値計算の結果が解析的な解とよく位置していることが分かる。