

M36a プラズマ粒子 (PIC) シミュレーションのための高精度 Boris 型数値解法

銭谷誠司 (神戸大学), 加藤恒彦 (国立天文台)

プラズマ粒子 (PIC) シミュレーションは、宇宙空間のさまざまな運動論プラズマ現象を扱うために有効なツールである。我々は、太陽フレアにおける粒子加速現象を理解するために、大規模 PIC シミュレーションを活用することを計画している。

PIC シミュレーションの根幹部の粒子の運動方程式を解く部分では、Boris 法 (Boris 1970; Buneman–Boris 法とも) が標準的に使われている。Boris 法は時間 2 次精度の解法で、適度な計算コストで粒子運動を安定に解くことができるなど、優れた性質を備えている。しかし、Boris 法はローレンツ力によるジャイロ回転を近似するため、磁場が強い箇所でジャイロ回転の位相に数値誤差が混入する。一方、この位相誤差を補正すると、リコネクションジェットなどのプラズマ高速流のバルク速度に別の誤差が混入する。

本講演では、非相対論の粒子運動にターゲットを絞って、Boris 法を高精度化する 3 つの手法を提案する。1 つめは高次精度化である。我々は、電磁場の扱いを工夫して、バルク誤差を生じずに粒子運動を $2n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) 次精度で解く手法を提案する。2 つめは、運動方程式を時間刻み $\Delta t/m$ (m は自然数) で解き、手順全体を m 回繰り返すサブサイクリングである。我々は、 m 回ぶんの手順を 1 ステップで計算する公式を導出することで、計算負荷を軽減することに成功した。3 つめは、両者のハイブリッド方式である。1 と 2 は互換性があるため、両者を組み合わせると、位相誤差とバルク速度を含めた全体の誤差を $\propto (m\Delta t)^{-2n}$ に抑えることができる。

本講演では、数値解法の導出過程と、数値誤差および計算負荷のベンチマーク結果を紹介する。