

研究代表者氏名(所属): 岸本 泰明(京都大学)

研究課題名

核融合・基礎プラズマの超並列シミュレーションに関する研究

JHPCN

自律性の高い核融合プラズマを制御する上で、乱流輸送現象の評価、及び予測は極めて重要な課題であり、幅広い時空間スケールを包括した解析が必要となる。一方、自然界のプラズマに広く目を転じると、固体や液体などの凝集相、気相、クラスターなど様々な状態にある物質が、多彩な原子・分子過程や衝突緩和過程、輻射過程を通して、複雑なプラズマ状態を作り出している。本研究では、前者を解析するコードとして、速度分布関数を位相空間で流体的に解くジャイロ運動論的Eulerian Vlasov(GK4D)コードを、後者を解析するコードとして、原子・分子過程や荷電粒子間の衝突・緩和過程などの基礎過程を自己無撞着に取り入れた拡張型3次元電磁粒子(EPIC3D)コードを開発した。それらのコードの並列化を含めた特徴、及びシミュレーション結果について報告する。

1. 位相空間多次元ジャイロ運動論的ブラゾフ方程式による乱流輸送コードの開発

背景・目的

・MHD-イオン系乱流といった異なったスケール間の相互作用を考慮したシミュレーションが、近年、精力的に行われている。

・イオン・電子系乱流を適切に扱えるジャイロ運動論的Vlasovシミュレーションは、その有効なツールの一つ。

・その中でも、位相空間に直接格子を設けて分布関数の時間発展を追跡するEulerian Vlasovシミュレーションは、開放系への拡張や数値ノイズが生じない点で優れている。

・位相空間5次元(又は4次元)を扱うため、計算コスト、メモリ量が膨大になる。

・更に、異なったスケール(質量比にして1:1876)を扱うためには、十分な解像度と、長時間の安定性が必要。

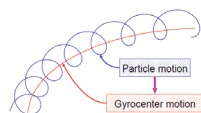
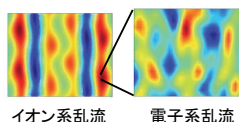
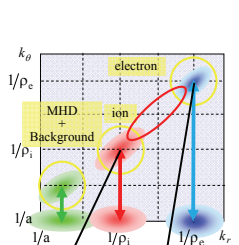
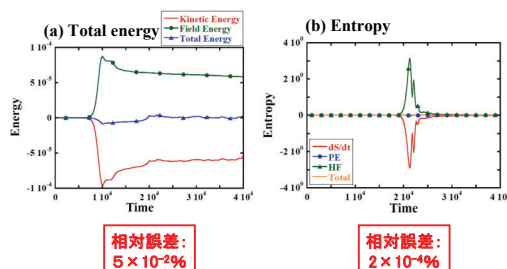
・そのような要請を満たした数値計算スキーム、並びに高並列化が必要不可欠。

イオン温度勾配不安定性のベンチマークテスト

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} + v_{\parallel} \frac{\partial f}{\partial z} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial f}{\partial v_{\parallel}} &= 0 \\ -\left(\nabla^2 + \frac{\rho_{ii}^2}{\lambda_{Di}^2} \nabla_{\perp}^2 \right) \phi + \frac{\rho_{ii}^2}{\lambda_{De}^2} (\phi - \langle \phi \rangle_{yz}) &= \int_{-\infty}^{\infty} f dv_{\parallel} - 1 \end{aligned} \right.$$

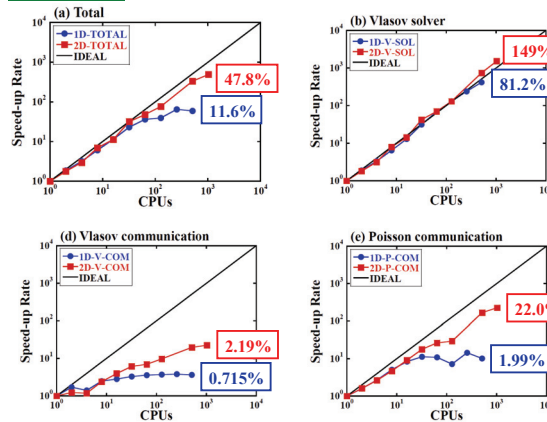
$$(N_x, N_y, N_z, N_{v_{\parallel}}) = (512, 512, 32, 128) \sim 8.6[GB]$$

保存量の時間発展

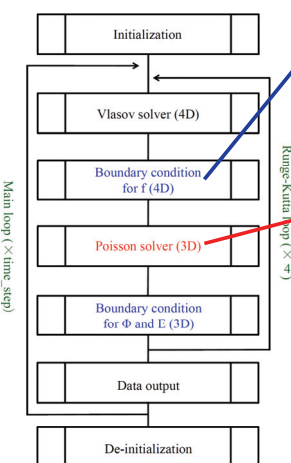


ジャイロ中心座標

計算/通信コスト

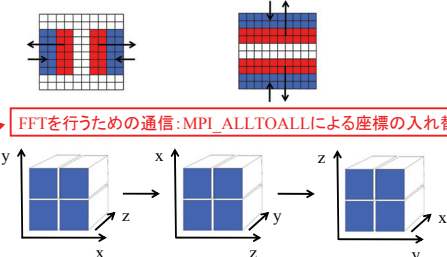


位相空間4次元ジャイロ運動論的Eulerian Vlasov(GK4D)コード



境界値の通信: MPI_SENDRECVによる4方向送受信

x-direction: $2 \times N_x / P_y \times N_z \times N_v$
y-direction: $(N_x / P_x + 4) \times 2 \times N_z \times N_v$



・Vlasov solver: Multi-Moment Morinishi scheme

$$f_i, \quad \rho_{i+1/2} = \int_{v_i}^{v_{i+1}} f dv, \quad u_{i+1/2} = \int_{v_i}^{v_{i+1}} v f dv, \quad \varepsilon_{i+1/2} = \int_{v_i}^{v_{i+1}} v^2 f dv$$

を独立変数として時間発展させる → 流体量の保存

・Poisson solver: FFT (P3DFFT)

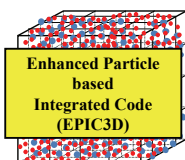
・Time integration: 4th-order Runge-Kutta scheme

・Parallelization: 2D(x-y) decomposition

2. 原子・緩和過程を取り入れた拡張型3次元電磁粒子コードの開発

拡張型3次元電磁粒子(EPIC3D)コード

- Fully relativistic treatment
 - Second and higher order form factor → Variable particle weight
- Direct field form using (E,B) Potential field (A,φ)
 - Local field solver imposed for (E,B) version
- Particle collision and relaxation
 - Relativistic pairing collision model
 - Langevin equation in PIC
- Polarization, ionization/recombination process
 - Field ionization, electron impact ionization
 - Photo ionization, radiative recombination, three-body recombination



▶ 電子・中性粒子衝突 (弾性衝突過程)
放電シミュレーションに必要な全素過程を導入

▶ 多光子吸収過程の導入
光電離プラズマ過程シミュレーション

▶ 電子・中性粒子衝突 (弾性衝突過程)
放電シミュレーションに必要な全素過程を導入

▶ 多光子吸収過程の導入
光電離プラズマ過程シミュレーション

▶ 電子・中性粒子衝突 (弾性衝突過程)
放電シミュレーションに必要な全素過程を導入

▶ 多光子吸収過程の導入
光電離プラズマ過程シミュレーション

放電シミュレーション

- ・ PIC approach
- ・ All relaxation process with Ne^{IV} ion and electron system except electron-neutral atom
- ・ Electron impact ionization
- ・ No electron attachment and recombination process
- ・ No field ionization

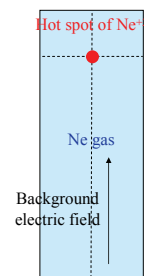
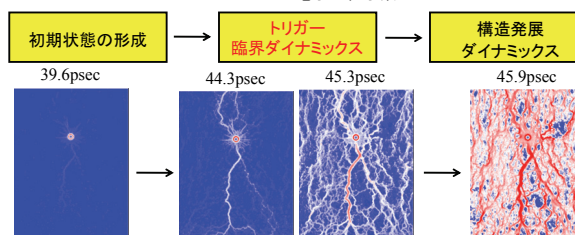
$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} (\mathbf{j}^p - j_x^{ext} \hat{\mathbf{x}})$$

$$j_x^{ext} = -\frac{1}{4\pi L_x} \frac{dV}{dt} + \langle j^p \rangle$$

$$(N_x, N_y, N_z) = (512, 2048, 2)$$

$$\text{イオン (Ne) の粒子数: } 4.2 \times 10^7$$

$$\text{電子の粒子数: } 4.2 \times 10^8$$



・並列化においては負荷の均等分散が課題。
・現在、領域分割型動的負荷分散アルゴリズム (OhHelp) の導入を行っている。