jh260033

大谷寛明(核融合科学研究所)

リアル粒子シミュレーションによるプラズマ科学の展開

参加者:長谷川裕記[1,2]（副代表）、宇佐見俊介[1]、樋田美栄子[1,2]、石黒静児[1,2]、堀内利得[1,2]、小谷 翼[3]、大野暢亮[4]、川原慎太郎[5]、滝沢寛之[6]、片桐孝洋[7]、曽我　隆[8]
[1]核融合研、[2]総研大、[3]京大、[4]兵庫県立大、[5]JAMSTEC、[6]東北大、[7]名大、[8]阪大

1. 研究目的

プラズマ:宇宙の典型的な物質状態（地球惑星科学、宇宙科学、核融合科学、材料プロセス工学など様々な分野で研究対象）→多様な現象
各分野でのプラズマパラメータは異なる→プラズマパラメータを特徴的なスケールで規格化
→共通の現象として議論　学際的な研究（例:プラズマ実験と太陽風—地球磁気圏—電離層でのプラズマ現象のアナロジー）
プラズマ科学:膨大な数の荷電粒子の集団から構成される巨視的な系であり、電磁場を介して多様で複雑な集団現象が研究対象
粒子シミュレーション（1960年代初期に最初に考案されたシミュレーションモデルの一つ）。荷電粒子と電磁場のダイナミクスを自己無撞着に解く。
利点:粒子運動という微視的ダイナミクスの追跡＋粒子-波相互作用や粒子運動論的効果の正確な追跡
難点:メモリ量や計算速度の制限→実験装置サイズのような巨視的な系全体の計算が非常に困難（イオン・電子のスケール差:時間で10^3、空間で10^2程度）
最適化の困難→粒子に働く力の計算や電荷密度・電流密度の計算でメモリへのランダムアクセス発生。
並列化の困難→均等な領域分割による並列化で偏った粒子密度分布が発生すると、並列負荷分散に偏りが発生
素過程の物理モデル（粒子間衝突や荷電交換、イオン再結合）は粒子間相互作用なので、粒子数Nに対して計算コストがN^2
プラズマ実験や太陽・地球磁気圏プラズマを模擬する境界条件や実験装置のジオメトリーや境界条件の設定

実験や観測に即したシミュレーションモデルを構築・導入して、シミュレーションを実行する「リアル粒子シミュレーション」コードのための研究・開発
リアル粒子シミュレーション
・実験や観測など、現実に即した境界条件やジオメトリを含むシミュレーション
・マクロ現象とミクロ現象とがお互いにフィードバックするシミュレーション
・素過程の物理現象を含むシミュレーション

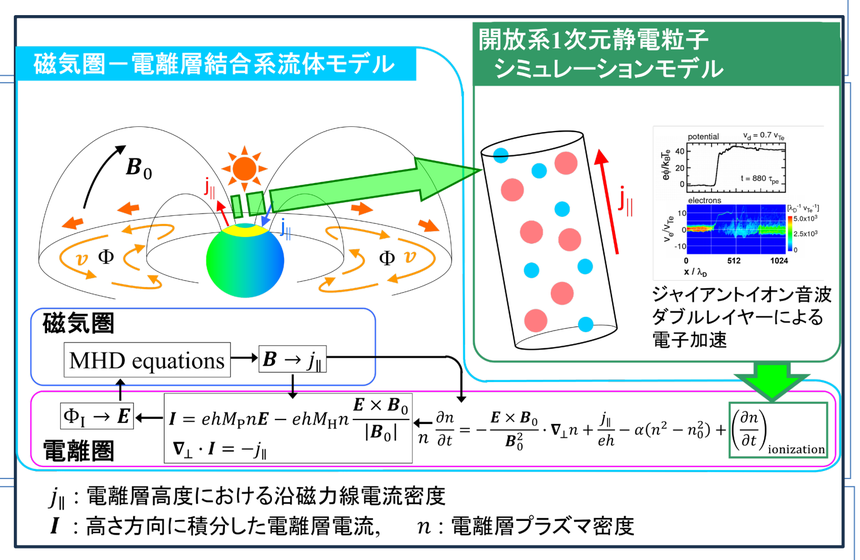
2. 研究課題

○コードやモデルの研究開発
1. スカラ機及びベクトル機への対応など、様々なアーキテクチャにおいて実行可能なコード
2. 多くの計算機システムで導入されているGPU を活用したコード
3. 現実に即した境界条件やジオメトリのモデル化から、
マクロ現象とミクロ現象とがお互いにフィードバックできるミクロ—マクロの結合モデル(Macro-Micro Interlocked (MMI)モデル)へ

○開発したコードの研究対象:プラズマ物理における微視的ダイナミクスの研究
磁気リコネクション現象、周辺プラズマにおける輸送現象、高速粒子が励起する波動現象
→　最適化・高速化・並列化の課題の洗い出し、コードの更なる高度化
○粒子による運動論的効果などを理解するための効果的な可視化表現法の研究

MMIモデル
1. マクロシミュレーション実行・各格子点の状態監視→ミクロ不安定性が発生する点を検知
2. 検知された点の局所マクロ状態をミクロコードの初期・境界条件として与え、ミクロシミュレーション実行
3. ミクロシミュレーションで十分に不安定性が成長→異常抵抗などの有効マクロ係数の算出
4. 有効マクロ係数をマクロ方程式に組み込み、マクロ的時間発展の更新

計算手法の異なるコードの結合（流体系と粒子系）
→結合手法の難しさ・計算手法に適したアーキテクチャが異なる



3. 研究計画

○リアル粒子シミュレーションコード研究開発
・コードのGPU化（OpenACC、OpenMPのオフロード機能によるGPU化）:GPU化された開放系1次元静電粒子コードを参考に研究開発を推進
・オーロラMMIコードの研究開発:
地球磁気圏-電離層結合系を記述するMHDマクロコードと、マクロ系内で成長した沿磁力線電流による微視的不安定性を計算するミクロコードの結合コード
コードに適したアーキテクチャが異なる→異機種間連携によるオーロラMMIコードの実行
・フーリエ型のモード展開法及び、粒子の多重極展開による場との結合を用いたプラズマ粒子コードの開発
○微視的ダイナミクスの研究
・磁気リコネクション現象の研究:
球状トーラス型・スフェロマック型装置での磁気リコネクション加熱を研究してきた。速度分布関数に基づくミクロ加熱機構の解明と高温プラズマ輸送過程の解析、最終緩和状態分岐の要因解明を進める。
・周辺プラズマにおける輸送現象の研究:
3次元静電粒子コードup3bdにより、周辺プラズマ輸送やフィラメント動態を研究してきた。大規模並列計算による形成過程解析と衝突・原子分子過程導入を進め、非接触時の径方向輸送増大機構を解明する。
・高速粒子が励起する波動現象の研究:
高速粒子励起波動のPIC研究を進め、低域混成波不安定性や背景粒子加速を解明してきた。高調波サイドバンド構造の解析、二次元・非一様系シミュレーション、非線形磁気音波による粒子加速研究を進める。