

# 大規模粒子シミュレーションから見える新しい物理

篠原 育（宇宙科学研究所）

現在の国産のスーパーコンピュータの性能は、アカデミックな用途に使える計算機に限定すると言違いなく世界最高水準にあります。今後もこのような恵まれた状況が続くかどうかは自明ではありませんが、現時点ではこの状況を最大限活かす努力をすべきであることは間違ひありません。ここでは計算機能力を活かした大規模計算をどのような方向性で進めるのかについて、1つの可能性を紹介したいと思います。最近のシミュレーション研究からは、世界最大規模の大規模数値計算を実行することによって、宇宙プラズマの基礎物理に対して新しい描像が発信されつつあります。最先端の計算機は、従来の“理論や観測の追認”的なシミュレーションを超えて、新しい理解の仕方を提示し得る能力を持ち始めた、と私たちは考えています。

## 1. 大規模計算とはいっても…

無衝突プラズマの物理を、電子の運動論的效果まで含んで計算を行う場合、私たちは粒子法を選択する必要があります。ここではより現実の世界を理解するために、粒子計算であっても電子スケールの現象だけではなく、イオンスケールまでを含んだ計算を行えることが目標です。これまでの計算ではできなかった、電子スケールの現象がイオンスケールの現象とどのようにお互いに影響を及ぼしあう／あわない、のかを知りたいからです。現実の宇宙プラズマの物理を理解するために、実パラメータで粒子シミュレーションを行うことができれば嬉しいのですが、

まず最初に、現在のスーパーコンピュータではどのくらいの計算ができるかを確認しておきましょう。粒子シミュレーションの制約条件としては、

$$\omega_{pe} \Delta t \leq 1$$

$$\Delta x \leq \lambda_{De}$$

があります。また、特に電子の数値加熱の観点から、必要な計算タイムステップ数以内に数値加熱が十分抑えられるように粒子数を設定する必要があります。これは非常に大雑把にいえば

$$\omega_{pe} t_{heating} \sim 10^3 n_{ptcl} (\lambda_{De} / \Delta x)^2$$

です。その他、シミュレーションの初期条件を特定するためには  $M = m_i / m_e, \sigma = \omega_{pe} / \Omega_e, v_e / c$

が必要です。できるだけ大きなグリッド数が取れるように  $\lambda_{De} \sim \Delta x$  と考え、 $c = 1$  と規格化すると、

$\omega_{pe} \Delta t \sim \lambda_{De} / (c / \omega_{pe}) = v_e / c < 1$  となるので、条件は自動的に満たされます。

また、粒子の運動にとって  $\Delta x / \Delta t > c$  が必要であるが、 $\Delta x = 1$  と規格化すれば、 $\Delta t < 1$  とすれば、条件を満たすことができます。

ここでは、イオンスケールの現象を粒子法で計算することが目標ですから、システムの空間サイズを 10 倍のイオン慣性長としましょう。つまり、 $c / \omega_{pi} = M^{1/2} (c / v_e) \lambda_{De}$  から、

$$N_{grid} = L^3 \sim (10M^{1/2}(c/v_e))^3.$$

また、時間スケールも 10 倍のイオンジャイロ周期程度は必要なので、 $\Omega_i = \omega_{pe}/(M\sigma)$  より、

$$T = 10\Omega_i^{-1} = 10(M\sigma)\omega_{pe}^{-1}.$$

したがって、必要（グリッドあたりの）粒子数は

$$n_{ptcl} \sim \omega_{pe} t_{Heating} / 10^3 \sim 10^{-2} (M\sigma)$$

と見積もることができます。 $\Delta t \sim (v_e/c)\omega_{pe}^{-1}$  なので、総計算量は

$$\propto N_{grid} n_{ptcl} T / \Delta t \sim 10^2 M^{7/2} \sigma^2 (c/v_e)^4$$

となります。質量比が大きいほど、電子温度が冷たい程、計算量が膨大に膨れ上がることに注意してください。例えば、現状で名古屋大学計算センターの VPP5000 システムで実行可能な典型的な 3 次元粒子シミュレーションのパラメータは、 $M = 100, \sigma = 1, v_e/c = 0.3$  程度です。即ち、

$$N_{grid} \sim 10^7, T / \Delta t = 10^4, n_{ptcl} = 10$$

程度の計算規模となります。VPP5000 の 16PE の並列計算を行うとおよそ 50 時間程度の計算になりますから、十分、実行可能な計算といえるでしょう。それでは、磁気圏プラズマシートの実際のパラメータを代入するとどうなるかを見ると、 $M \sim 1840, \sigma = 10, v_e/c = 0.1$  程度になりますから、先程の計算量に対して、 $\sim 10^8$  もの大きな計算が必要となってしまうことが予想されます。これではいくら並列計算技術が進んだとしても現状の計算機システムでは到底実現できるような値ではありません。これはほんの 10 倍のイオン慣性長程度のサイズについての値にすぎませんから、磁気圏全体を実パラメータで粒子法のシミュレーションすることはとても考えることができません。

以上に見てきたように、私たちは限られた人工的に設定したパラメータによってのみでしか、無衝突プラズマの世界を粒子シミュレーションすることができません。それでも、質量比が 100 のオーダーまで取れるようになってきたことで、新しい視点が見えるようになってきています。一番大きな理由は、電子スケールとイオンスケールがはっきりと分離できることになったので、それぞれのスケール間の結合過程がはっきりと見えるようになったことです。実パラメータの世界を計算で再現することが絶望的に困難な現状では、シミュレーションによって質量比などに対するスケーリング則を見出すことによって、現実世界を垣間見る努力をすることがとても大事な視点です。

## 2. 大規模計算の目指すもの

一口に大規模計算といっても計算の目的は以下の 2 つを分けて考える必要があります。

- (1) 現実世界のシミュレートを目指す計算 - 地学的により現実に近い状況設定を計算機上に構築して宇宙空間に発生する現象を理解する。例えば、宇宙天気予報への応用を目指した地球磁気圏のグローバル MHD シミュレーション等、現実世界の予測を目指した計算。

- (2) 計算機上の物理実験 - 物理的により理想化されたプラズマ環境を計算機上に構築して宇宙プラズマの基礎物理を理解する。新しい物理過程の発見やより精密な理論体系構築を目指した計算。  
 (1)とは異なった意味で、正しくプラズマ環境を計算機上に実現するために大きな計算機リソースを必要とする。

理想的な計算環境が整えば2者は同じ計算の中に共存できるかもしれません、計算機リソースは有限なので、(1)の意味で複雑な現実世界をシミュレートするためには何らかの近似が不可避です。それゆえ、(2)の基礎物理的な理解の進展なしには(1)のシミュレーションの精密化はありません。例えば、境界面を通したプラズマの輸送過程はMHD近似で取り扱うことができず、輸送係数(粘性、抵抗、熱伝導)としてモデル化してMHD方程式に組み込む手法が広く用いられていますが、輸送の物理過程の詳細が理解出来ていないためにモデルの妥当性を評価できません。両側面のシミュレーション研究を相補的に進めることが大切ですが、ここでは特に(2)の基礎物理的な理解の重要性を強調したいと思います。

### 3. 現在でもここまでできる！ ~ 新しい物理の発見

宇宙プラズマ中には様々な時空間スケールの複雑な現象が現れます、そのスケールのダイナミックレンジは非常に広いため、全てのスケールを同時に取り扱うことは困難です。これまでプラズマ物理学では、適当な近似によって各スケール階層に適当な数値計算コードを開発・利用することによって、シミュレーション研究を進めてきました。このようなコードには、計算が軽い順に、  
 MHD(磁気流体近似) Hall-MHD(磁気流体近似にHall効果を組み込む) hybrid( $m_e=0$ )  
 (イオンは粒子、電子は質量0の流体として扱う) two-fluid( $m_e=0$ ) (2流体近似で電子の慣性効果も取り入れる) hybrid( $m_e \neq 0$ ) (イオンは粒子、電子は流体、かつ、電子慣性効果も取り入れる) particle(イオン、電子共に粒子として取り扱う) の6種類があります。

~ のコードは最小空間スケールがイオンスケールなので、比較的大きな空間領域を取り扱うことができます。~ のコードでは、既に、地球磁気圏全体を十分取り扱えるようになっており、目的(1)の用途の研究に盛んに用いられ始めました。最近では Hall効果の重要性が認識されているので、~ を使った研究も始まりつつあります。

、の計算は目的(1)的な側面が強調されがちですが、目的(2)の研究にもまだまだ面白いテーマが潜んでいます。例えば、リコネクション・ジェットの先端部がリヒトマイア・メッシュコフ不安定によって複雑な構造を示すことが、

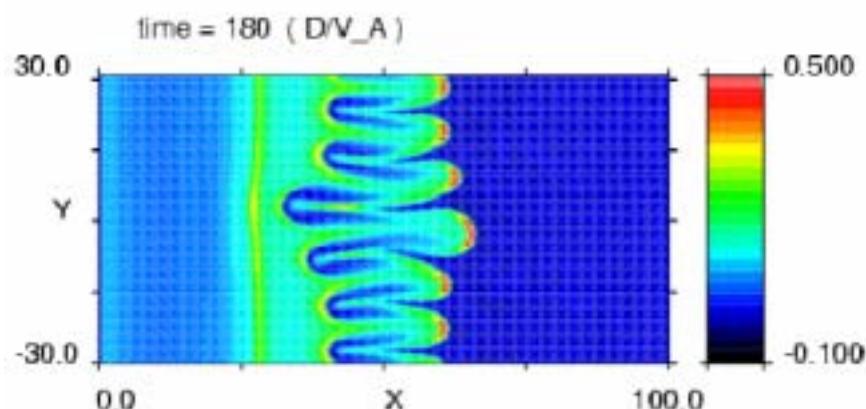


図1 ジェット先端部で発生するリヒトマイア・メッシュコフ不安定。色は密度を表す。

中村や丹所らの計算によって発見されました(図1)。ジェット先端部はこの不安定の非線形段階に分裂を起こすのですが、分裂したジェットは磁気圏で観測されるベースティ・バルク・フローに対応するのではないかと考えられています。一方、GEOTAIL衛星の観測結果等からイオンの

運動論的效果の重要性が示唆されて、(1)の意味でもを使った磁気圏スケールの計算が注目を浴びつつあります。宮城らは磁気圏尾部形状の初期条件からリコネクションを発生させる3次元のシミュレーションを行い、リコネクションに伴って発生するイオンビームと沿磁力線電流系の発達の関係について調べました。その結果、地球側境界に沿磁力線電流系の先端が到達するよりもイオンビームの方が早く到達することが明らかになったのです(図2)。これまで、リコネクションによって発生する沿磁力線電流系が電離層に到達してオーロラが発光すると考えられていましたが、シミュレーション結果はイオンビームが最初にオーロラを光らせる可能性を示しており、サブストームの発生機構を考える上で興味深い結果として注目されています。

～のコードでは電子慣性効果を取り扱う為に、時空間ス

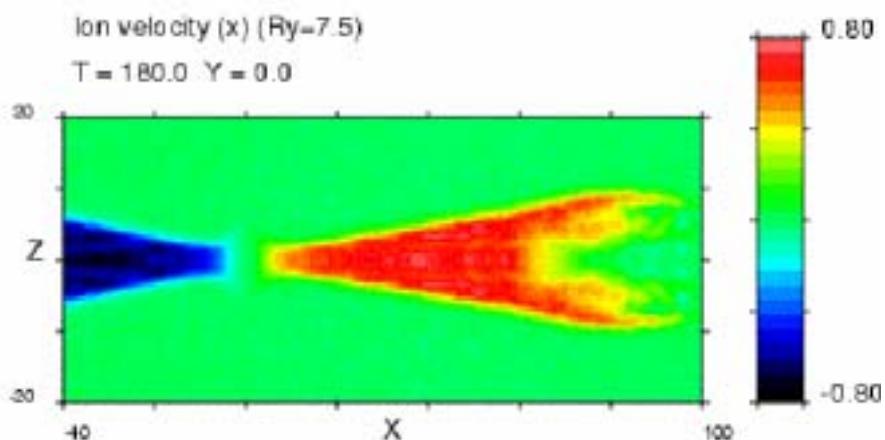


図2 磁気圏尾部配位を初期条件とする磁気リコネクション。色は速度のX成分を表す。

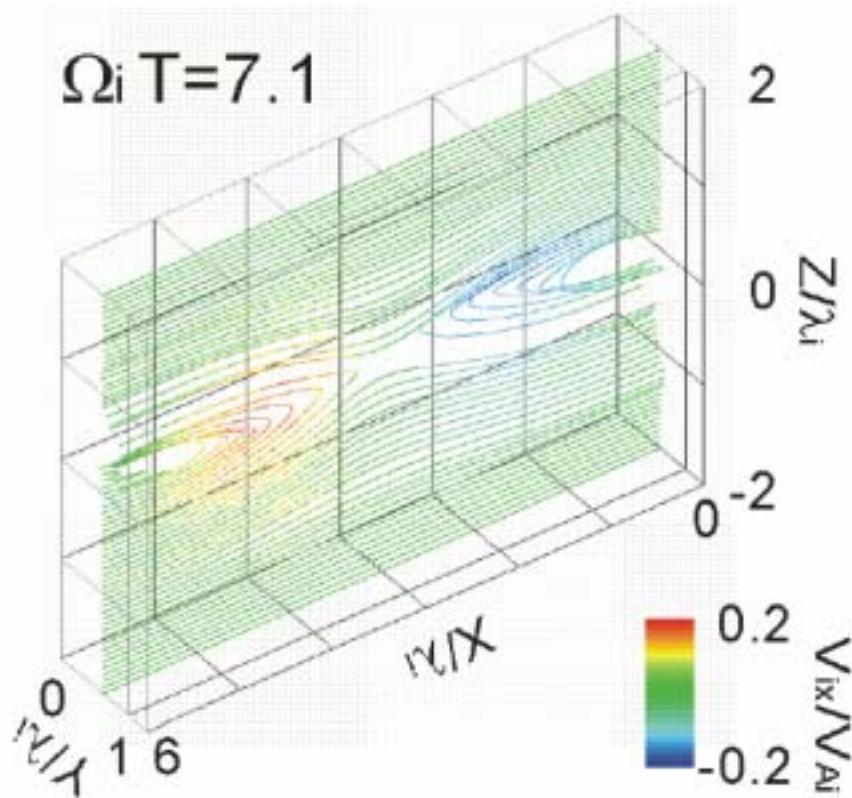


図3 3次元粒子シミュレーションによる磁気リコネクション。磁力線が示されており、磁力線上の色はイオン速度を表す。

ケールは電子を基準に考える必要があります。これまで大きな領域・時間を計算する際は小さなイオン - 電子質量比 ( $m_i/m_e$ ) しか取れなかったので、折角、電子慣性効果を取り入れてもイオンと電子の間のスケール分離を十分に行うことができませんでした。しかし、最初に考察したように現在では、イオン - 電子のスケール分離を十分に行った上で、イ

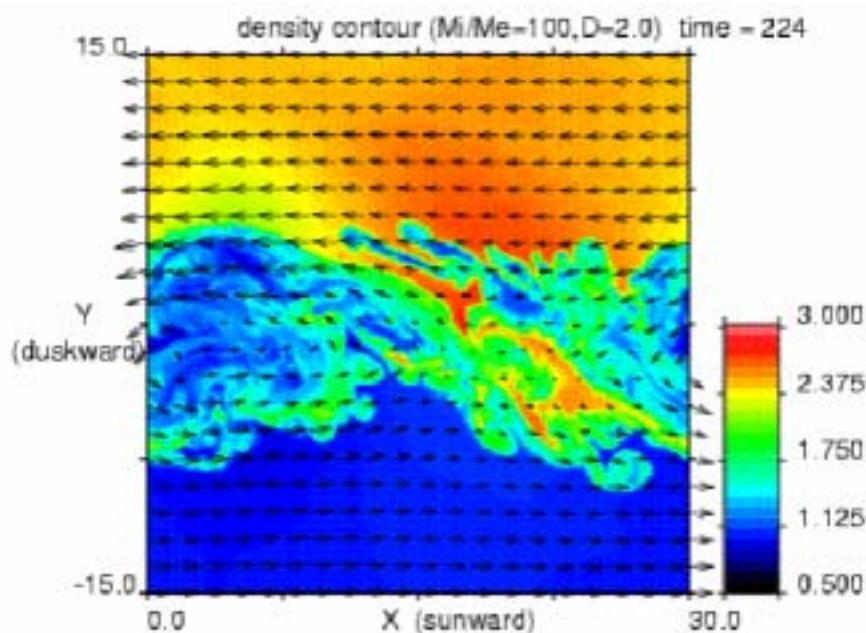


図 4 ケルビン・ヘルムホルツ不安定の 2 流体シミュレーション（電子慣性効果を含む）。色は密度を表し、矢印はイオンの流速ベクトル。

オンスケールの現象を扱うことができるようになりました。最近、私たちはこの最大規模の計算結果から新しい重要な物理過程を発見しました。従来のプラズマ物理学は、空間スケールの分離を基本とした階層構造（デバイ長、電子慣性長、イオン慣性長、MHD スケール）に依拠して構築されていますが、イオンと電子のスケールが十分分離できているように思える場合においてさえ、電子スケールとイオンスケールの現象はスケールの違いを乗り越えて動的に結合し得ることが明らかになりました。例えば篠原らは、従来の理論ではサブストームを説明できるような速い磁気リコネクションを引き起こす為には電子スケールの厚さの電流層が必要と考えられていたものを、スケールの異なる不安定の結合によってイオンスケールの厚さの電流層でも非常に速いリコネクションの成長が起こり得ることを コードのシミュレーションによって示しました（図 3）。また、ケルビン・ヘルムホルツ不安定によるプラズマ混合の問題についても、林や中村らの コードによる計算によって、電子慣性効果に起因する不安定との結合によって渦構造が崩壊する過程が発見されています（図 4）。これらの結果は、従来の考え方のように単純な輸送係数という形で静的にモデル化するのでは不十分で、動的な結合過程をモデル化する必要があることを示しており、今後の研究の発展が強く望まれています。

#### 4. まとめ

以上に紹介したように、現在の計算機資源を最大限に活用して、私たちは計算機シミュレーションから従来の理論や観測に無い新しい物理現象を発見できるようになりました。今後、登場する次世代・次々世代スーパーコンピュータの能力は、こうした新しい物理過程の発見や予測の道具として益々利用価値が高まるでしょう。また、精度の高い計算結果からは観測や実験に対して“何を観測すべきか？”という要請を出すことができるようになるはずで、これまで以上に計算機シミュレーションと観測データ解析の連携が重要になるでしょう。太陽地球系分野はこれまで「その場観測」

ができるという特色を最大限に活かして宇宙プラズマ物理の理解をリードしてきました。私たちは今後もこの優れた利点を継承し、観測的実証と理論・数値計算を車の両輪として、宇宙プラズマの精密な記述体系の構築を目指すことが私たちの1つの大きな使命だと思います。