

課題名 (タイトル) :

高速磁気リコネクションにともなう異常電気抵抗発生機構の解明

利用者氏名 : 藤本 桂三

理研での所属研究室名 : 和光研究所 基幹研究所 戎崎計算宇宙物理研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

1940 年代後半に太陽フレアにおける粒子加速機構を説明するモデルとして磁気リコネクション過程が提唱された。それ以来、磁気リコネクションは天体プラズマや、惑星磁気圏プラズマ、実験室プラズマなど、さまざまな磁化プラズマ中で磁場を散逸させ爆発的に粒子を加速・加熱させるプロセスとして注目をあびてきた。それにもかかわらず、いかに効率よく磁場を散逸させ磁気エネルギーを粒子の運動エネルギーに変換するか、という根本的なメカニズム (磁気拡散機構) が未だに解明されていない。磁場を散逸させるためには電気抵抗が必要であるが、宇宙プラズマは非常に希薄であるため古典的なクーロン衝突による電気抵抗では、到底実際の現象を説明することはできない。研究者の多くは、なんらかのプラズマ波動によって荷電粒子が散乱され、その結果電気抵抗 (いわゆる異常電気抵抗) が発生すると考えている。しかし、実際にどのような波動によってどのように散乱されるかは、理論的にも観測的にも未解明である。理論的観点から言えば、磁気リコネクションのもつ強い非線形性とマルチスケール性が数学的解析および自己無撞着な計算機シミュレーションを困難にしている。一方、観測的には、時間・空間分解能の制約から磁気拡散機構を同定することは非常に困難である。この難問に挑戦するため、これまでマイクロスケールとマクロスケールを同時に、かつ、無撞着に記述することのできる新しいシミュレーションコードの開発をおこなってきた。本研究では、独自に開発したコードを用いて異常電気抵抗発生機構を解明することを目的とする。

2. 具体的な利用内容、計算方法

週末運用を利用して PC クラスタ 8192 コアを占

有した大規模な計算を実施した。計算方法は、基本的には従来のプラズマ電磁粒子シミュレーションと同等である。つまり、電磁場の時間発展と荷電粒子 (超粒子) の運動を同時に記述することによって、電磁流体シミュレーションでは記述できないような粒子の運動論的效果を取り入れた計算を実施した。この手法は、計算コストが大きいため、一般的にマクロスケールの構造を追うことができない。そこで、本研究では、従来の電磁粒子コード (Particle-in-Cell (PIC) コード) に適合細分化格子 (Adaptive Mesh Refinement (AMR)) を適用した新しい電磁粒子コード (AMR-PIC コード) を使うことによって、従来の手法では実現不可能な大規模な粒子シミュレーションを実現した。

磁気リコネクションはハリス平衡解 $B_x(z) = -B_0 \tanh(z/\lambda)$ に微小擾乱を与えることによって開始する。用いたパラメータは、 $\lambda = 0.5\lambda_i$ 、質量比 $m_i/m_e = 100$ 、温度比 $T_i/T_e = 5.0$ 、システムサイズ $L_x \times L_y \times L_z = 81\lambda_i \times 10\lambda_i \times 81\lambda_i$ である。ここで、 λ_i はイオン (陽子) の慣性長を示す。

3. 結果

大規模な 3 次元電磁粒子シミュレーションを実施した結果、高速磁気リコネクションにともなう磁気 X 線近傍に電子電流層をキックさせるような電磁波動が励起することが明らかになった (図 1)。このモードは磁力線にほぼ垂直方向に伝播し、波数 $k \sim \sqrt{\lambda_i \lambda_e}$ 、周波数 $\omega \sim (\omega_{ci} \omega_{ce})^{1/4}$ というスケールを持っている。

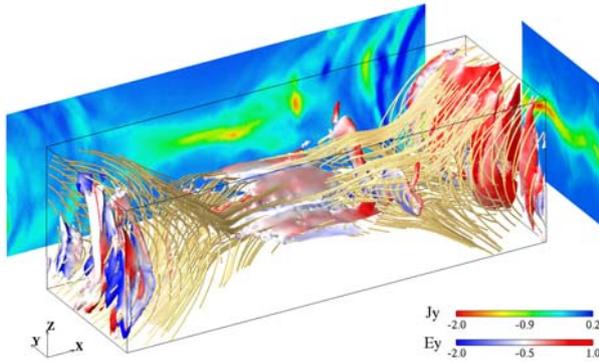


図 1：高速磁気リコネクション過程における磁気 X 線近傍の様子。等値面は $|J|=0.8$ を示し、等値面上に E_y 、側面に J_y がそれぞれ描かれている。

ここで、 λ_i と λ_e はそれぞれイオン（陽子）と電子の慣性長、 ω_{ci} と ω_{ce} はそれぞれイオンと電子の回旋周波数をあらわす。この電磁波動が磁気拡散過程に与える影響を調べるため、一般化されたオームの法則

$$\begin{aligned} \langle -E_y \rangle = & \frac{1}{\langle n \rangle} \langle (nV_e) \times (B) \rangle_y + \frac{1}{e\langle n \rangle} \langle \nabla \cdot P_e \rangle_y \\ & + \frac{m_e}{e\langle n \rangle} \langle V_e \cdot \nabla V_{ey} \rangle + \frac{1}{\langle n \rangle} \langle \delta n \delta E_y \rangle + \frac{1}{\langle n \rangle} \langle \delta(nV_e) \times \delta B \rangle_y \end{aligned}$$

における各項の大きさを調べた。ここで $\langle \rangle$ は y 方向の平均を意味する。図 2（上図）に結果を示す。磁気 X 線近傍では電磁的な乱流による異常項がリコネクション電場に対して 50% 程度の寄与があることがわかる。一方、図 2（下図）に 2 次元リコネクションにおけるプロファイルを示す。このとき、磁気 X 線近傍におけるリコネクション電場は電子粘性項とほぼ完全につりあっていることがわかる。このことから、3 次元リコネクションでは 2 次元リコネクションの場合とは異なり、電磁波動にともなう電子の乱流輸送効果が磁気拡散過程において重要な役割を果たしていることが実証された。さらに、プラズモイドと呼ばれるプラズマの塊が磁気 X 線近傍から下流域に放出されるのにもよって乱流輸送効果が増大することも明らかになった。

次に、線形波動解析を実施し、シミュレーションにおいて得られた電磁波動が現実のパラメータでも発生し得るかどうかを調べた。その結果、この波動の成長率は電子-イオンの質量比には大きく依存しないことがわかり、実際の宇宙プラ

ズマ中でも励起し得ることを示した。

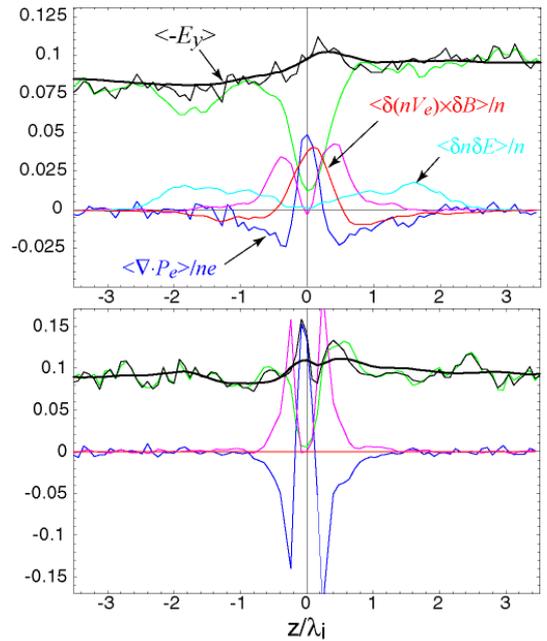


図 2：一般化されたオームの法則における各項のプロファイル。3次元リコネクションの場合（上図）と2次元リコネクションの場合（下図）を示す。

4. まとめ

磁気リコネクションの大規模な 3 次元粒子シミュレーションを実施し、磁気 X 線近傍の 3 次元的な磁気拡散機構を調べた。その結果、2 次元リコネクションの場合とは異なり、電流層に沿って電磁波動が励起されることがわかった。そして、これにともなう電磁乱流が電子の異常運動量輸送を引き起こし、磁気拡散過程において重要な役割を果たすことを初めて実証した。

5. 今後の計画・展望

より現実的な質量比 ($m_i/m_e > 100$) のもとで計算を実行し、異常輸送効果を定量的に評価する必要がある。また、将来的には、粒子シミュレーションによって明らかにされた磁気拡散機構をモデル化し流体的シミュレーションモデルに埋め込むことを考えている。これにより、自己無撞着な磁気リコネクション過程の天体プラズマや実験室プラズマへの応用が可能になる。

平成 23 年度 RICC 利用研究成果リスト

【国際会議、学会などでの口頭発表】

- 1) Fujimoto, K., AMR-PIC model and application to magnetic reconnection, 10th International School/Symposium for Space Simulations, Banff, Canada, July (2011).
- 2) 藤本桂三, Electromagnetic wave emission from the thin current sheet formed during fast magnetic reconnection, 第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 兵庫県神戸市, 11 月 (2011)