

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、これまでミ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 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。

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ン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。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。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。電磁波動が発生することで、磁気 X 線周辺に乱流が形成され、それによって電子の流れが妨げられることが明らかになった。とくに、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なると、乱流効果が増大しリコネクション電場への寄与が顕著になることがわかった。このことから、3 次元リコネクション過程では電磁乱流による運動量輸送効果が磁気拡散過程において重要になることが実証された。さらに、線形解析を実施することによ

て、現実的なパラメータでもシミュレーションで得られた電磁波動が励起しうることを示した。

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することによって、磁気 X 線近傍で電磁乱流による磁気拡散効果が顕著になることを初めて実証した。

5. 今後の計画・展望

シミュレーションで得られた電磁波動の励起メカニズムを解明することによって、波動の線形特性を理解する。

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)