

動的ペチェック過程による磁気リコネクションの新たな高速化機構

柴山 拓也 (名古屋大学大学院、STEL)

Abstract

磁気リコネクションは磁力線のつなぎかえにより磁気エネルギーを運動エネルギーや熱エネルギーに変換する過程であり、Yohkoh 衛星以後の観測結果などから太陽フレアは磁気リコネクションによって引き起こされると考えられている。しかし、フレアが起こる太陽コロナ中は電気抵抗が非常に小さいために効率的にリコネクションを起こすことが難しい。Petschek 理論によると低電気抵抗環境でも効率的にリコネクションを起こすことができるが、Petschek リコネクションは一樣抵抗では安定に存在しないことが数値的及び理論的に示唆されている。我々は今までよりも大きなシステムサイズで精密な数値計算を行うことで、一樣抵抗モデルであっても非線形発展段階で Petschek 理論で予想されるスローショック構造が自発的に形成することを発見した。この過程では非線形発展により形成した大きなプラズモイドが電流シート内を速い速度で運動することが重要な役割を担っており、スローショック構造は運動するプラズモイドの前面に形成する。プラズモイドは電流シートからの排出と新たなプラズモイドの形成を繰り返すため、この過程は非定常的に繰り返し起こり磁気リコネクションを進行させる。これによりリコネクションの高速化が起こり、太陽フレアを説明するのに必要とされる 0.01 程度のリコネクション率が得られることを明らかにした。

1 Introduction

磁気リコネクションは磁力線のつなぎかえにより磁気エネルギーを運動エネルギーや熱エネルギーに変換する過程であり、太陽フレアや磁気圏サブストーム、トーラスプラズマの緩和現象の原因と考えられている。しかし、太陽コロナのような電気抵抗 η が小さく、すなわち Lundquist 数 $S(S = LV_a/\eta)$ が大きな条件で太陽フレアの観測に合うような時間スケールでエネルギー変換を行うのは難しい。そのためどのようにして効率的にリコネクションを進行させるかというリコネクションの高速化問題については長く議論が行われている。

Sweet-Parker 理論ではリコネクション率は $S^{-1/2}$ に比例するため、太陽コロナのような高 Lundquist 数 ($S = 10^{12-14}$) 環境ではリコネクション率が非常に小さくなってしまふ。Petschek 理論では非常に小さい磁気拡散領域を仮定することで太陽コロナのパラメータでも効率的にリコネクションを起こすことができるが、これまでの数値計算によると Petschek リコネクションは一樣抵抗では安定に存在せず、これを実現するには異常抵抗モデルなどで磁気拡散領域を局所的に維持するためのメカニズムが必要

であることが示唆されている (Kulsrud 2011; Forbes et al. 2013)。このため、Petschek リコネクションが自発的に発生し得るかという問題は未だに解決していない。

一方、Sweet-Parker タイプの電流層は高 Lundquist 数の場合、テアリング不安定性に対して不安定になり、磁気島 (プラズモイド) が形成することで二次的な電流層に分割されることが知られている。近年の数値計算によるとプラズモイドが多数形成するような高磁気 Lundquist 数環境ではリコネクション率は Lundquist 数によらず、ほぼ一定になることが報告されている (Shibata & Tanuma 2001; Bhattacharjee et al. 2009)。しかし、その物理メカニズムは明らかになっていない。

2 Methods and Results

我々は今までよりも大きなシステムサイズで精密な数値計算を行うことで、一樣抵抗モデルであっても非線形発展段階で Petschek 理論で予想されるスローショック構造が自発的に形成することを発見した。図 1 はその時間発展の様子である。 $t < 300$ の

初期段階では Sweet-Parker 型の電流シートが形成する。300 < t < 500 では Tearing 不安定となった電流シート内にプラズモイドが形成する。 $t > 500$ では形成したプラズモイドの運動に伴って電流シートが枝分かれし Petschek によって予想されたスローショックが形成される。

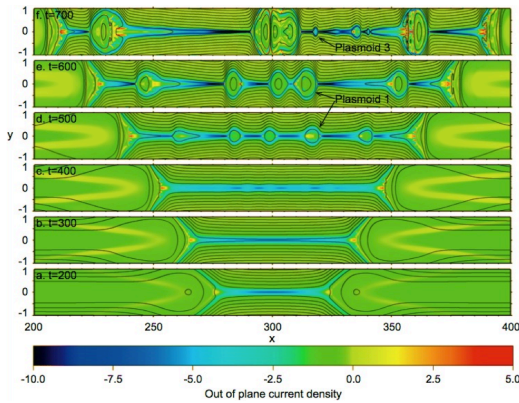


図 1: 系の時間発展

図 1 からわかるようにこの過程では非線形発展により形成した大きなプラズモイドが電流シート内を速い速度で運動することが重要な役割を担っている。図 2 はあるプラズモイドまわりの各物理量をプロットしたものである。また、右下のパネルは他の 3 つのパネル内の赤線に沿った各物理量のプロファイルである。M で表されているのがスローモードマッハ数であり、上流でスーパースロー、下流でサブスローとなっていることからこの不連続面がスローモードショックであることがわかる。このようにスローショック構造は運動するプラズモイドの前面に形成される。ただし、Petschek 理論とは異なりスローショックは X ポイントから 1 方向にのみ現れる。

プラズモイドは電流シートからの排出と新たなプラズモイドの形成を繰り返すため、この過程は非定常的に繰り返し起こり磁気リコネクションを進行させる。これによりリコネクションの高速化が起こり、太陽フレアを説明するのに必要とされる 0.01 程度のリコネクション率が高 Lundquist 数領域で得られることを明らかにした。(図 3)

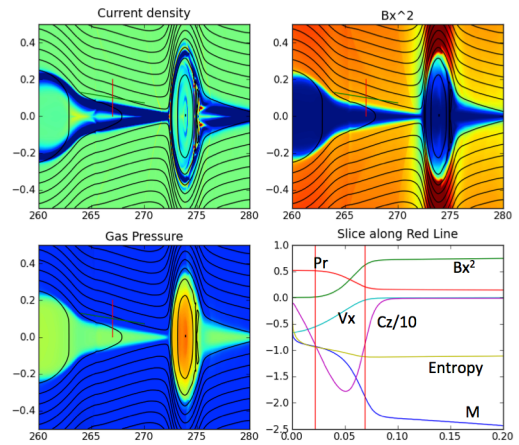


図 2: プラズモイドまわりの構造の詳細

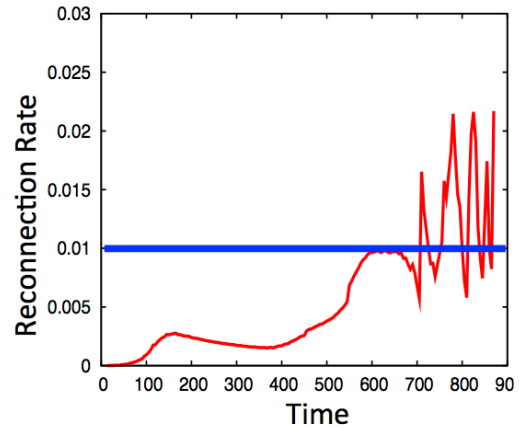


図 3: リコネクション率の時間変化

3 Conclusion

我々はこの高速リコネクションレジームを「動的ペテックリコネクション (Dynamical Petschek Reconnection)」と名付けた。このレジームではリコネクションを高速化させるためにマイクロスケールの物理過程や異常抵抗モデルなどは必要なく、一様抵抗のみでリコネクションの高速化が実現する。プラズモイドの運動が周囲のプラズマの流れに影響を与えることで電流を局在化させる働きをし、Petschek 理論で予想されるスローショックにより効率的にエネルギー変換を行う。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号 : YITP-W-15-04)
及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Kulsrud, R. M. 2011, *Physics of Plasmas*, 18, 111201
- Forbes, T. G., Priest, E. R., Seaton, D. B., & Litvinenko, Y. E. 2013, *Physics of Plasmas*, 20, 052902
- Shibata, K., & Tanuma, S. 2001, *Earth, Planets, and Space*, 53, 473
- Bhattacharjee, A., Huang, Y.-M., Yang, H., & Rogers, B. 2009, *Physics of Plasmas*, 16, 112102