

Energetic Phenomena of the Solar Flares (博士論文)

— Plasmoid Ejections and Particle Transport and Acceleration —

太陽物理学において、太陽フレアにおける粒子加速の問題は、いまだ未解決の問題である。地球磁気圏とは異なり、太陽物理学ではミクロな現象である粒子加速現象は直接観測できないため、理論的なアプローチが必須である。しかし、粒子加速現象のスケールとフレアのスケールには、大きな隔たりがあり理論的に研究することは容易ではない。本学位論文では、まず観測的に大きなスケールでフレアを捉え、現在提唱されているモデルの妥当性を検証し、その長を捉え、徐々に着眼点をミクロなスケールに移し、最終的に粒子加速のメカニズムに迫ることを目的とした大変チャレンジングな研究である。

近年、太陽フレアのメカニズムとして、磁気リコネクションモデルが確立されつつある。このモデルは相反する磁力線が再結合する際に、膨大なエネルギーを解放するというものである。しかし、磁気リコネクションモデルから予測される物理量を観測的、定量的に行った研究はそれほど多くはない。そこで本論文では、初めにフレアの特徴的な物理を見積もり、磁気リコネクションモデルから示唆される理論的な物理量と比較することを行った。その結果、磁気リコネクションモデルの妥当性を定量的に示すとともに、「Neupert Effect」と呼ばれるエネルギーに関する経験則に似た、新たなエネルギー関係式を見つけることに成功した。

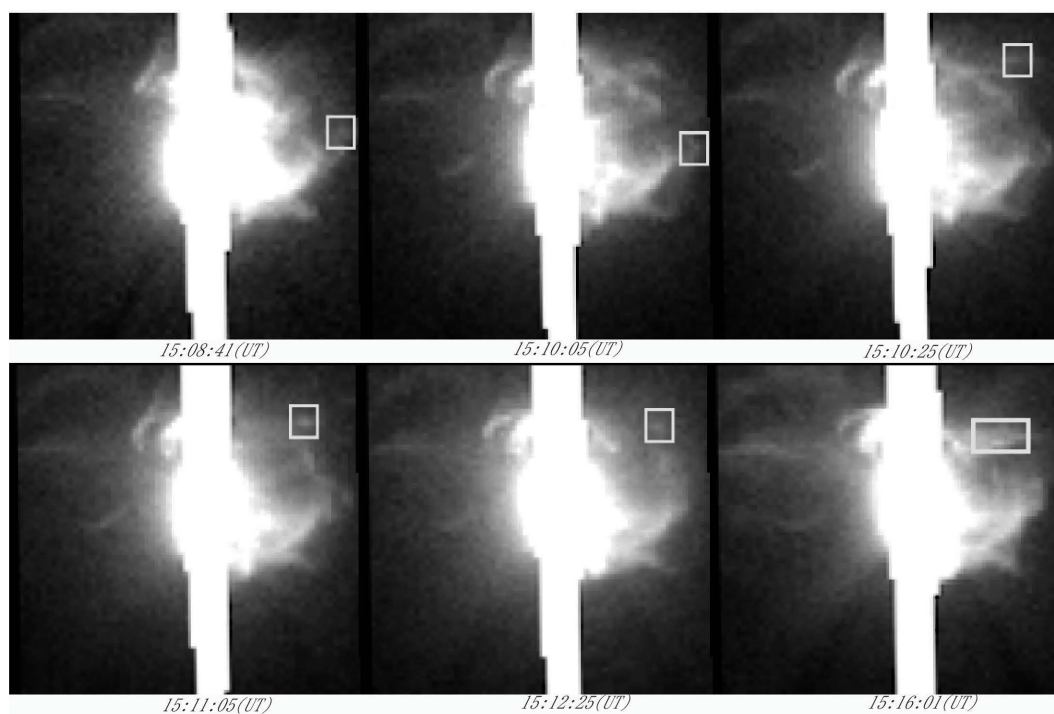


図: 軟 X 線画像で見た、複数個のプラズマ塊噴出現象。中央付近にある縦方向の明るい領域は太陽フレアが明るすぎるにより CCD 信号が飽和していることを示す。このフレアの初期段階に (右手上方へ) 次々に飛び出すプラズマ塊を各々の画像内の白い四角で囲ってある。

次に、この磁気リコネクションモデルに基づき、粒子加速現象と密接に関係のあるフレアの非熱的放射に着目して研究を行った。その結果、一つのフレア現象において激しいバースト現象が何度も起こり、その一つ一つの爆発に対応した様々な物理量を持つプラズマの塊が噴出し、加速されているという結果を世界で初めて得ることができた(図参照)。この結果は、プラズマ噴出物がエネルギー解放機構と相補的に重要な役割を果たしており、磁気リコネクションが断続的に生じていることを観測的に示唆している。これは、Shibata (1995) によって提案されていた旧来の磁気リコネクションモデルを拡張した統一モデルの解釈とよく合うものであった。

更に、フレアで加速された非熱的な高エネルギー粒子に着目し、磁気リコネクションによって加速された粒子がフレア磁気ループ中でどのように輸送されているかを調べた。その結果、異なるエネルギーを持つ粒子は加速メカニズムが異なっている可能性がるという過去の研究に対し、「エネルギー依存性はなく共通の粒子加速機構が働いている」という太陽物理学における粒子加速の問題に対して、大きな提案を行うことができた。

最後に、近年発見された MHD 方程式の厳密解である Craig-Henton 解を用い、磁気リコネクション領域がどのような状況で粒子が効率的に加速されるのかを調べた。上に示したように、観測的研究から磁気リコネクションは非定常(不安定)的に生じていると考えられる。そこで Craig-Henton 解の不安定解の MHD シミュレーション結果を用い、DC 加速機構を仮定したテスト粒子計算を行った。その結果、tearing 不安定性などによって磁気リコネクション領域が乱流的(不安定)構造になった場合は、安定的にリコネクションを起こす場合に比べて粒子が効率的に加速される可能性がある、という結果を得た。

以上のことから、本学位論文は「磁気リコネクションは断続的に生じ、乱流的なフラクタル構造(不安定構造)こそが太陽フレアや粒子加速現象に対して大きな鍵を握っている可能性がある」という太陽物理学や粒子加速問題に対して新たな知見を与えるに至った。

(高崎 宏之 記)