平成 21 年度国立天文台天文シミュレーションプロジェクト成果報告書

太陽フレアに伴う爆発的粒子加速機構の研究

岡　光夫 (カリフォルニア大学バークレー校)

利用カテゴリ　XT4A ・ SX9A

太陽フレアは基本的には電磁流体力学（MHD）の範囲で理解されるが、粒子加速を議論する際には、MHDだけでは記述できないミクロなスケールの現象を理解する必要がある。具体的には磁気リコネクションの拡散領域まで含んだ粒子効果・非断熱効果、被加速粒子と波動との相互作用である。そこで、本研究では、イオンと電子の双方を粒子として扱う PIC コード（Particle-in-Cell code）を利用することで、太陽フレアにともなって起きていると思われるこれらの各要素について調べる。もちろん、これらすべてを一度に研究するのは難しいし、粒子シミュレーションでは磁気リコネクションの拡散領域を中心とした領域しか扱えない。事実これまでの PIC 法による研究の多くは「太陽フレア」というよりも「磁気リコネクション」の素過程の研究が中心であった。本研究では上記の限界を踏まえたうえで、中心エンジンとしての「磁気リコネクション」の枠を超え、「太陽フレア」に伴う粒子加速の解明に踏み込むことを目指す。そのために、２００９年度の研究においては、リコネクションジェットが障害物と衝突してつくる「パイルアップ領域」の物理と、長いカレントシートにおいて多数のリコネクションが起きることを想定した「マルチ・アイランド・コアレッセンス」を２本の柱として研究を進めた。ここでは、具体的な成果の上がった後者について述べる。

カレントシートがある程度薄い場合には、テアリング不安定によってカレントの強弱が発達し、複数のリコネクションがほぼ同時に発生する。磁力線を描くと「X 型」の形状が並ぶことになるが、非線形段階ではリコネクションアウトフローの衝突によって閉じた磁力線が形成され、「O 型」の形状が並ぶ。それぞれの閉じた磁力線は磁気アイランドとよばれ、加熱されたプラズマ粒子で満たされている。さらに時間発展するといくつかの磁気アイランドが互いに衝突、合体（コアレッセンス）を繰り返す。この過程で注意すべきは、アイランド同士の合体の際に、２次的な磁気リコネクションを必要とする点である。一連のコアレッセンスを通して、多数の２次リコネクションが発生し、それによって電子が加速される。加速メカニズムの詳細は実際に電子の軌道を追うことで調べ、合計７つの加速メカニズムを確認した。そのうち３つは本研究で見出された新しい加速メカニズムである。

上記のいわば「マルチ・アイランド・コアレッセンス」モデルによって得られたエネルギースペクトルを図１に示す。上段左がシミュレーションによって得られたものであるが、観測との比較のため、粒子エネルギー（横軸）を初期熱エネルギーで規格化したうえで、太陽コロナの一般的な温度 2MK を過程して keV の単位に直してある。シミュレーションであるので、粒子数（縦軸）は任意の値にスケールできる。一方、上段右が硬 X 線観測衛星 RHESSI によって得られた太陽フレアのエネルギースペクトルである。得られるデータは X 線のフォトン・カウントであるので横軸もフォトンのエネルギーである。シミュレーションはこのイベントを再現するために実行されたものではなく、そうであっても技術的な理由からさまざまな仮定や制約があるため単純な比較はできない。しかし、（１）マルチ・アイランド・コアレッセンス・モデルによって電子が少なくとも 30keV にまで加速される、（２）30keV までに限ってみればシミュレーションで得られたスペクトルの傾きが観測された X 線のスペクトルの傾きとほぼ一致する、ことは本研究で得られた重要な結

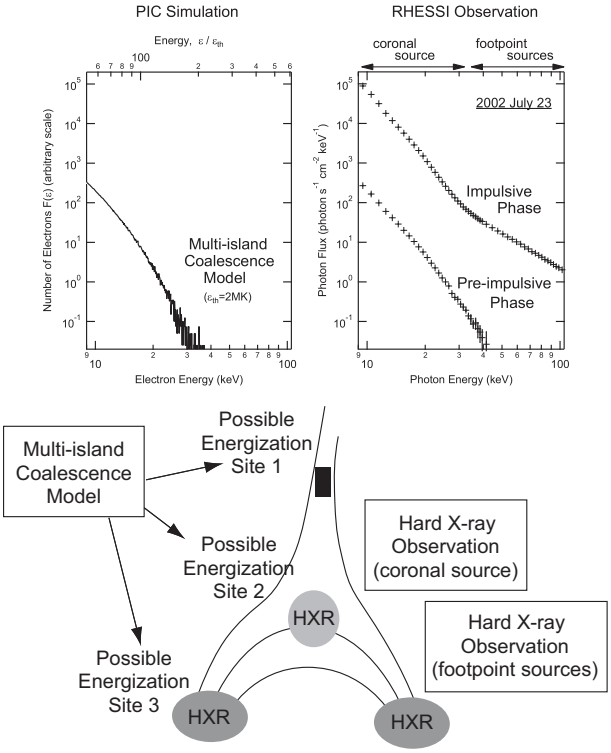

図 1:

果である。太陽フレアにともなう粒子加速を理解するうえで、本研究でとりくんだ「マルチ・アイランド・コアレッセンス」の有効性が示されたとも言える。なお、マルチ・アイランド・コアレッセンスは薄いカレントシートさえあればどこでも発生する。従来より強い乱流が太陽フレアにともなって発生することが議論されている。乱流は太陽フレアのいたるところで発生する可能性があることから、粒子加速の場所もさまざまな可能性がある（図１下段）。