

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	高橋 卓也
論文題目	Dynamics of flare shocks and propagation of coronal mass ejection		
(論文内容の要旨)			
コロナ質量放出(CME)は、太陽コロナでの突発的な磁気エネルギー解放に伴い、大量のプラズマが惑星間空間に噴出する現象である。特に、噴出速度の大きなCMEは、その前面に衝撃波を伴い惑星間空間を伝搬していく。その際、CMEの前面には、衝撃波に圧縮されたプラズマが蓄積し、シースと呼ばれる高密度プラズマ領域が形成される。高速のCMEおよびその前面のシースが地球に到達することが、巨大磁気嵐や宇宙放射線の大規模増加といった宇宙嵐の原因であることが知られている。一方で、近年、太陽に似た星で、最大級の太陽フレアの10倍-1000倍の規模を持つ巨大なフレア(スーパーフレア)が発生していることも明らかになってきた。 巨大な太陽フレアに伴うCMEの形成・伝搬と地球への影響を解明することは、宇宙プラズマ擾乱の理解の基礎となるだけでなく、宇宙嵐の影響を強く受ける我々の文明社会の維持に直接貢献する点で社会的にも重要な意義を持つ。 本学位論文は、巨大フレアに伴うCMEおよび衝撃波の地球への影響を議論するための理論的基礎の構築を試みたものである。 第2章では、太陽フレアの規模と、それに伴うCMEの質量・速度、さらにCME前面の衝撃波で加速された高エネルギー陽子流束との関係を記述するスケーリング則を、簡単な物理的仮定から導いた。また、観測統計解析の結果と導いたスケーリング則とを比較し、整合性を確かめた。 第3章では、CMEの地球への伝搬を記述する新しい解析的モデル(SAPモデル)を構築した。惑星間空間における速いCMEの伝搬を記述するためには、CME前面の衝撃波の駆動とCMEの減速伝搬とを同時に扱うことが必要である。SAPモデルでは、シースプラズマの蓄積過程を考慮に入れることにより、初めてこの課題を解決した。さらに、観測されたCMEの速度・質量をもとにSAPモデルに基づく地球への到達時間の予測を行い、観測と整合的であることを確かめた。さらに、第2章で得たスケーリング則とSAPモデルとから、スーパーフレアに伴うCMEは、地球まではほぼ減速を受けずに伝搬すること、その結果、観測史上最大の磁気嵐と同程度もしくはそれ以上の磁気嵐が発生することなどを、初めて定量的に示した。 第4章および第5章では、巨大な太陽フレアに伴い観測されたコロナ中の衝撃波とプロミネンスとの相互作用を調べた。超新星残骸などの星間衝撃波と分子雲との相互作用の力学素過程は、衝撃波とガス雲の相互作用として、星形成の根幹に関わる星間物理学の基本問題の一つと認識され広く研究されてきた。申請者は、フレアに伴うコロナ衝撃波とプロミネンスの相互作用が、時間発展を追うことのできる唯一の天体衝撃波—ガス雲相互作用の例として重要であることを指摘し、特に衝撃波からプロミネンスへの運動量の輸送過程を3次元の磁気流体力学数値シミュレーションを用いて調べた。さらに、運動量輸送の磁気流体過程を記述する解析的なモデルを組み立て、解析モデルが3次元シミュレーションを非常によく再現することを、広いパラメータ領域で確かめた。特に、衝撃波からプロミネンスへの運動量輸送は、衝撃波の透過と磁気張力の効果が決めることを示した。観測データと理論モデルの比較から、フレアに伴			

うコロナ中の衝撃波の物理量をこれまでにない精度で得ることに成功した。フレアに伴うコロナ衝撃波は、地球近くで計測される宇宙放射線の主要な加速現場の一つであると考えられている。コロナ衝撃波の物理量の優れた診断方法を確立した本研究は、巨大フレアに伴う宇宙放射線の大規模増加の理解にも寄与する重要な成果である。

(論文審査の結果の要旨)

近年の恒星観測から、太陽と似た星で超巨大フレア（スーパーフレア）が多数発見された。これらの発見を受けて、近代文明が経験したことのない巨大フレアをもたらす宇宙嵐（大規模な磁気嵐や宇宙放射線増加）の性質と規模について、ここ数年、分野をまたいだ議論が一気に活発化している。特に、巨大宇宙嵐の原因である、巨大なフレアに伴うコロナ質量放出(CME)の形成と惑星間空間における伝搬、地球への影響を統一的に記述する理論の構築が急務であった。

本申請論文は、申請者独自の視点で設定した物理課題の解決を通して、巨大フレアに伴うCMEの宇宙天気への影響を議論する理論的基礎の構築を試みている。

申請者はまず、少ない物理的仮定から、太陽フレアの規模と、それに伴うCMEの質量と噴出速度、高エネルギー陽子流束の関係を記述するスケーリング則を導いた。一方で、CMEの観測統計解析を行い、その結果とスケーリング則を比較して、広い範囲のフレア規模でスケーリング則が成立することを確かめた。これにより、我々が経験したことのない巨大なフレアに伴うCMEの速度や質量を評価する理論的基礎を得た。この結果は、宇宙嵐の理解のみならず、恒星フレアに伴う噴出現象の理解の基礎となるものである。

一般に、太陽から高速で噴出したCMEは惑星間空間で強い減速を受ける。しかし、ごくまれに地球近傍でも大きな速度を保ったCMEが観測されることがあり、それらは巨大な宇宙嵐を引き起こす。申請者は、速いCMEの全面に形成される「シース」領域への太陽風プラズマの蓄積過程に着目することにより、CMEに駆動された衝撃波の伝搬を記述する解析的モデル(SAPモデル)を構築することに初めて成功した。これによって、速いCMEの惑星間空間における減速過程を、少ない仮定に基づいて解析的に記述できるようになった。さらに、申請者は、先に導いたスケーリング則とSAPモデルとを組み合わせることで、スーパーフレアに伴うCMEは地球までほぼ減速を受けずに到達することを明らかにした。

学位論文後半では、太陽フレアに伴う衝撃波とプロミネンスとの相互作用についての理論を構築し、その理論をフレアに伴うコロナ中の衝撃波の物理量診断に応用する方法を提示している。

申請者は、まず、フレア衝撃波からプロミネンスが運動量を受け取る磁気流体過程を記述する解析モデルを構築した。また、3次元磁気流体計算との比較から、解析モデルの定量的妥当性を広いパラメータ空間で検証した。さらに、観測と理論モデルの比較から、フレア衝撃波の物理量を得る方法を確立した。コロナ中のフレア衝撃波は、地球近くで計測される宇宙放射線の主要な加速現場でもある。その優れた物理量診断の方法を提示する本研究は、巨大フレアの引き起こす宇宙放射線増加の基礎理解に大きく寄与するものとしても評価される。

星間物理学の分野では、超新星残骸と分子雲の相互作用の力学素過程が、衝撃波とガス雲の相互作用として重要な研究対象となってきた。本研究は、フレア衝撃波とプロミネンスの相互作用が、時間発展を追うことのできる天体衝撃波—ガス雲相互作用の唯一の例であることを指摘した点や、特に衝撃波からガス雲に運動量が輸送される磁気流体過程を理論的に解明した点でも高く評価できる。

申請者の研究は、独自の視点に基づいて設定した課題の解決を通して、大規模な太陽フレアの引き起こす宇宙嵐の理解の進展に大きく寄与した。また、太陽活動現

象を新たな視点から捉えることで広く宇宙物理学の進展に寄与するものでもある。よって本申請論文は、博士（理学）の学位論文として十分に価値のあるものと認める。なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心とし、これらに関連した研究分野について平成29年1月13日に口頭試問を行った。その結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 2017年 3月 31日以降