

論文審査の結果の要旨

氏名 庄田 宗人

本論文は、太陽風と呼ばれる宇宙空間を超音速で膨張している太陽大気のプラズマについて、電磁流体シミュレーションを用いて、どのようにして太陽風が加熱・加速されるのかを調べた研究である。太陽風加速は、太陽対流層で励起された電磁流体波動が上層大気まで輸送され、その電磁流体波動のエネルギーを利用して加速するというモデルが提唱されているが、本論文ではこの電磁流体波動モデルについて、大振幅電磁流体波動におけるパラメトリック減衰不安定とその乱流過程による波動エネルギー散逸で、高速太陽風を加熱・加速することができることを示した。論文は全部で6章から構成されている。

まず第1章は、60年ほど前にパーカ博士によって提唱された古典的な太陽風加速理論の解説と、過去の太陽風観測や理論シミュレーション研究について簡単に触れられている。第1章に引き続いて第2章においては、太陽風乱流や太陽風加速の電磁流体シミュレーションに関する先行研究と本論文の目的が具体的に述べられている。特に過去のシミュレーション研究では、観測されている密度揺らぎ効果が十分に取り入れられておらず、また観測と比較して太陽風加速が十分でない問題点があり、それらを克服するために本論文では圧縮性の電磁流体波動によるイオン音波モードとアルフベン波動の相互作用で起きるパラメトリック減衰過程を組み入れることで高速太陽風の改良モデルを提案することが述べられている。

第3章では、3次元的に広がる座標系の下での空間1次元の圧縮性電磁流体シミュレーションによる結果と考察が述べられている。磁場に平行方向は電磁流体方程式を解くことでパラメトリック減衰過程とその波動カスケードを記述し、磁場に垂直方向については現象論的な乱流モデルを導入した方程式系を用いて、その非線形時間発展を詳細に調べている。まず太陽風の加熱は、導入した乱流モデルの相関長(correlation-length)によって、相関長が小さいと乱流加熱が支配的となり、一方相関長が大きいと先行研究で仮定されていた衝撃波散逸加熱が有効となることを示し、衝撃波散逸と乱流散逸の両者を併せた散逸はほぼ一定であることを見出した。そして実際の太陽風で想定される相関長では、乱流効果の方が衝撃波効果よりもやや大きい値を取ることが述べられている。また太陽風速度は相関長と強い正相関があり、一方太陽風による質量損失率とは弱い負の相関があり、先行研究とも整合的であることを論じた。更に、観測される密度揺らぎは、パラメトリック減衰過程による音波モードの揺らぎで十分に説明可能であること、クロス・ヘリシティの空間分布についても音波モードで散乱されるアルフベン波と整合的であることを議論した。以上の考察から、過去の研究では明らかにされていないパラメトリック減衰不安定による圧縮性

乱流効果が大切であることを示した。

第 4 章では、空間 3 次元の電磁流体シミュレーションを行うことで、第 3 章で導入した 1 次元による現象論的乱流散逸モデルの正当性を補強する議論が展開されている。本研究では計算資源節約のため 3 次元全球ではなく二つの偏角を制限した部分球の計算を行っているが、その条件下でも現在のスーパーコンピューターを用いても高レイノルズ数の乱流を正確に取り扱うことは困難である。野心的 3 次元計算であり、第 3 章で導入した現象論的乱流モデルが有効に働いているのかどうかについて、シミュレーション結果をもとに波動の相関関数解析などを駆使して調べられている。太陽から外向きに伝搬するアルフベン波と内向きのアルフベン波を分離して、波動の乱流スペクトルが折れ曲がったパワー則で記述できることや波動の 2 次の相関関数を解析することで第 3 章において議論したパラメトリック減衰機構が働いていることを確かめた。また 2018 年夏に打ち上げられた、太陽半径にして約 9 倍まで接近して太陽風を観測するパーカー・ソーラー・プローブ(Parker Solar Probe)で、今回の主な結論であるパラメトリック減衰過程が実際に働いているかどうかを検証する観測的研究の提案が述べられている。

第 5 章と 6 章は、まとめと考察および将来への展望が簡潔に述べられている。本論文の主要な結論として、太陽対流層から伝搬してくる外向き伝搬のアルフベン波とイオン音波の波動-波動相互作用で密度揺らぎと同時に太陽風に向かって伝搬する内向きのアルフベン波が励起され、これらの双方向のアルフベン波によって磁場に垂直方向にも乱流カスケードが起き、散逸加熱が有効に働いていることを明らかにした。

なお、本論文で論述された太陽風加速に関する研究は、太陽系のみならず恒星風などの宇宙におけるプラズマ風の問題と密接に関連しており、中心天体から超音速で膨張するプラズマ物理の理解が前進したことが認められる。本論文は、横山央明および鈴木建との共同研究であるが、論文提出者が主体となって数値シミュレーション研究をおこなったもので、論文提出者の寄与が十分であると認められる。

以上により、本審査委員会は、本論文が博士学位論文として十分な内容を含んでいるものと判定し、論文提出者に博士（理学）の学位を授与できると認める。