

(論文内容の要旨)

本博士論文は、「太陽のコロナ加熱」という問題に関する理論研究の成果をまとめたものである。太陽コロナの温度が100万度の超高温状態にあることは70年以上も前に発見された。太陽の表面は6000度でしかないのに、なぜ、コロナはこのような超高温状態に加熱されているのか？ これはコロナ加熱問題とよばれる長年の未解決の難問である。

コロナ加熱問題を解明するために様々な理論がつけられてきた。その一つはアルフヴェン波がコロナを100万度以上まで加熱するというアルフヴェン波加熱機構であり、もうひとつは多くの小さな磁気リコネクション（ナノフレア）が起きることによって加熱するというナノフレア加熱機構である。しかしながら、これらの加熱機構を観測的に区別することは非常に難しい。

太陽フレアやナノフレアの発生頻度はベキ分布に従うことがわかっている。このベキ指数は観測できる低エネルギーのイベントがコロナ加熱に寄与するかどうかを示すものであり、コロナ加熱を解明する上で重要である。本論文第二章の結論の一つは、ベキ指数を調べればコロナがどこでどのように加熱されているかが分かるということである。その上それぞれの加熱機構でできたコロナのダイナミクスはかなり違うということが示された。高温プラズマではアルフヴェン波で加熱されたループの足下に下降流が見えるが、ナノフレアで加熱された場合は同じ場所に上昇流が見える。従ってアルフヴェン波とナノフレアのコロナ加熱機構はそれぞれ区別することができることが示された。

第三章ではアルフヴェン波加熱機構についてより詳しくパラメータ・サーヴェイが行われている。ループの長さや厚さ、光球の磁場の強さとアルフヴェン波の特性、それぞれのパラメータを変更し、アルフヴェン波加熱機構に当たる影響を調べた。結論の一つは、コロナを十分に加熱するようにループは長くて（ ~ 80 Mm）厚く（光球からコロナへかけての磁束管断面積の増大率 ~ 800 ）なければ100万度以上の平均温度にならないことがわかった。また、高温に加熱するために200–300秒周期のアルフヴェン波が一番効果的な波であることが示された。

第四章では、以上の知見をコロナルレインに応用する研究がなされている。コロナルレインとは、活動領域のコロナループに沿って彩層のような低温度、高密度プラズマが出現し落下する現象である。ひので衛星の可視光磁場望遠鏡でCa II H彩層輝線で観測したコロナルレインを解析し、数値シミュレーションと比較した。ループの足下における加熱機構（例えばナノフレア加熱）では熱不安定性によってコロナルレインをよく説明できる。一方、アルフヴェン波で一様に加熱した場合、熱不安定性が抑制され、コロナルレインはできない。太陽観測で古くから知られているコロナルレインはコロナ加熱機構を区別するための重要な情報を与えることも明らかになった。

本学位論文全体の結論は、アルフヴェン波は太陽の活動領域でのループを効果的に加熱するには不十分であり、静穏領域でのループにとっては有効な加熱機構である、ということである。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、太陽コロナ加熱問題という、天文学・宇宙物理学の古典的難問に挑戦した理論研究の成果をまとめたものである。太陽は典型的な恒星であり、ほとんどの恒星に太陽コロナのような超高温コロナがあることがわかっている。また、近年は降着円盤や銀河・銀河団でも超高温コロナの存在が観測されている。その意味でも、コロナ加熱問題は天文学・宇宙物理学の基本問題であると言える。

まず本論文は、コロナ加熱機構として有力であると考えられている、二つの説、アルフヴェン波説とナノフレア（微小リコネクション）説をとりあげ、これらのメカニズムで加熱されたコロナループを、非定常 1.5 次元電磁流体数値シミュレーションによって再現した。その上で、観測されている太陽フレアやナノフレアの発生頻度がベキ分布に従うことがわかっていることに着目し、このベキ指数が、アルフヴェン波加熱説とナノフレア加熱説で、どういう値をとるかどうかが、シミュレーション結果に基づいて詳細に検討した。非定常コロナの再現のシミュレーション計算だけでもなかなかの大仕事であるが、著者はそれをやり遂げただけでなく、膨大な計算結果について詳細な解析を行い、「ベキ指数を調べればコロナがどこでどのように加熱されているか」が分かるということの世界で初めて示した。これは、ベキ指数が 2 より大きいのか小さいかだけの単純な議論しかしていなかった世界のコロナ加熱研究業界に衝撃を与える結果である。また、それぞれの加熱機構でできたコロナの速度場はかなり異なることなども見出し、アルフヴェン波とナノフレアのコロナ加熱機構は速度場の違いから区別することができる、ということも世界で初めて示した。さらに本論文はアルフヴェン波加熱に基づくコロナループの性質を徹底的にパラメータ・サーヴェイし、コロナルレインに応用するという興味深い研究も行っている。

これらのシミュレーションと観測の比較から、アルフヴェン波は太陽の活動領域でのループを効果的に加熱するには不十分で、静穏領域でのループにとっては有効な加熱機構である、という結論を得ている。これはきわめて重要な結論である。もちろん、本論文での計算の 1.5 次元（空間 1 次元、ベクトル量 2 次元）という仮定の制約上、本研究で取り入れられていない 3 次元的なアルフヴェン波散逸過程はまだあり、将来、本モデルが改良される可能性はあるが、本研究の結果は最終モデルに近いものであると言って良いであろう。

以上のように申請者の研究は、太陽物理学、とりわけ、コロナ加熱問題に関して新たな知見をもたらした、独創的かつ重要な成果である。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。