

# 論文審査の結果の要旨

氏名 天野 孝伸

高温希薄なプラズマで満たされた宇宙空間は、熱的プラズマに加えて非熱的成分が存在しているが、非熱的成分はべき乗則に従うエネルギースペクトルを示し、そのエネルギー密度はしばしば熱的成分に対して無視できないことが知られている。この非熱的成分の起源として統計フェルミ加速モデルが有力視されてきているが、フェルミ加速が有効に機能するためには、何らかのメカニズムで熱的プラズマの一部を中間エネルギーまで加熱・加速する必要があり、そのメカニズムは「粒子注入」の未解決問題となっていた。本論文では、衝撃波近傍での非線形プラズマ波動の性質を詳しく調べることにより、短時間で効率よく非熱的エネルギーまで粒子を加速する「波乗り加速機構」が粒子注入機構に有効であることを見出した。電子の注入問題の理解を大きく前進させた高く評価できる論文である。

まず第1章は先行研究のレビューであり、無衝突衝撃波の構造、乱流場の下での統計フェルミ加速機構、直接加速として知られるドリフト加速や波乗り加速について解説されている。これらの先行研究成果を踏まえて、第2章では、電子注入問題を Particle-In-Cell (PIC) シミュレーションを用いて考察する。プロトンの注入機構に対してはこれまで幾つかのアイデアが提案されているが、慣性質量の小さい電子に対しては加速加熱メカニズムの理解が乏しかった。衝撃波遷移領域での2流体プラズマ不安定による大振幅静電場の励起とその電場による波乗り加速に着目し、無衝突衝撃波の PIC シミュレーションをおこなうことにより粒子加速過程を詳細に解析した。シミュレーション結果を基に、高マッハ数の衝撃波に応用できる電子注入モデルを構築すると同時に、その構築した理論モデルが超新星残骸での衝撃波観測結果も説明できることを示した。

第3章では2次元空間でのブーネマン不安定のシミュレーションを行い、斜め伝播効果による非線形波動の飽和過程の理論を構築した。第2章では単純化のため非線形波動の励起について1次元性を仮定していたため、2流体プラズマ不安定の評価については慎重な議論が必要である。2次元 PIC シミュレーションを行うことにより、斜め伝播効果を考慮したブーネマン不安定の飽和レベルを

解析し、飽和レベルが 1 次元モデルの 20-30%程度に抑えられることを定量的に明らかにした。

第 4 章では、3 章でのブーネマン不安定の非線形過程を考慮して、磁場が存在する衝撃波近傍での波乗り加速メカニズムへと考察を進めていく。衝撃波遷移層を抽出した 2 次元周期系の非線形発展を PIC シミュレーションで調べることにより、1 次元過程では現れなかった静電ポテンシャル構造に対して斜め方向に運動する電子も加速に有効に働くこと、そしてこれが電子注入過程にも大きく寄与することを見出した。

第 3 章および 4 章では、衝撃波遷移領域だけを模擬した閉じた系（周期系）での考察であったが実際の衝撃波は開放系であり、衝撃波遷移領域にエネルギー運動量の流入がある。第 5 章では、2 次元衝撃波の大規模数値シミュレーションを実行して、電子注入問題および衝撃波の多次元構造を考察している。2 次元衝撃波の研究は、現在のスーパーコンピュータを用いても野心的な研究である。大規模計算の結果、開放系（衝撃波系）になると周期系とは異なり波乗り加速の効率が上がること、また静電ポテンシャルの 2 次元幾何学的構造によって、エネルギー喪失を経ることなく多数回の波乗り加速が可能であることを発見した。これら一連のシミュレーション結果より、2 章で提案した電子注入機構のシナリオの正当性を強固なものとした。最終章では、衝撃波粒子加速の解決に向けた今後の展望が述べられている。

論文は共同研究の部分もあるが、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行っており、論文提出者の鋭い洞察力がなくては完成しなかったのは言うまでもない。本人の寄与が十分にあると考えられる。

以上の理由により、博士（理学）の学位に十分に値すると認める。