

論文審査の結果の要旨

氏名 斎藤 達彦

本論文は、四章からなる。

第一章は、一般序論であり、銀河系内における宇宙線生成起源とされる超新星残骸衝撃波の観測事例をまとめ、宇宙線加速メカニズムを説明する標準理論である衝撃波統計加速(Diffusive Shock Acceleration: DSA)についての概説を行っている。さらに、本論文の主眼である宇宙線からの反作用を考慮した NLDSA(Nonlinear Diffusive Shock Acceleration)についての説明へと続く。NLDSA は実際の衝撃波加速において有効に働いているという観測的、理論的指摘がこれまで多くなされており、衝撃波加速問題において非常に重要である。古典的な NLDSA 理論では宇宙線による正のフィードバック効果によって宇宙線が全エネルギーの 50%以上を占めるという高効率な解が存在している。多くの先行研究がこの解の存在を自明なものとして扱ってきた中、本論文では、自然法則的観点から、その存在に対して懐疑的な姿勢を取っている。近年、理論・観測両面から盛んに議論されている衝撃波近傍領域での大振幅磁場が、宇宙線による正のフィードバック効果を抑制するものであると指摘し、その効果をも取り入れた上での NLDSA 理論の再評価を行うという本論文の目的が述べられている。

第二章は、数値シミュレーションを用いた衝撃波の構造安定性から NLDSA における宇宙線の生成効率の多寡を推定している。NLDSA においては、通常の DSA とは異なり衝撃波の定常状態における上流と下流の関係性を表すランキン・ユゴニオ関係が多価関数で表される。同じ上流のパラメータに対して、宇宙線生成効率の異なる 3 つの解析解が存在していることが知られている。熱的プラズマと宇宙線をともに流体で近似した 2 流体モデルにおける数値安定性解析から、3 つの定常解の中で最も高効率な解と最も低効率な解の 2 つが構造的に安定であることを明らかにした。2 つの間にある解は不安定解であり、常に低効率な解へと遷移することが分かった。次に、宇宙線が初期に存在しない状態からの衝撃波の進化を数値シミュレーションによって再現した。このような初期条件からの時間発展では、3 つの定常解のうち最も効率の低い解のみが唯一実現することが分かった。これは宇宙線の負のフィードバック効果が働いていることを示唆し、高効率な宇宙線生成に対して否定的な結果である。以上の結果はマッハ数や粒子注入の強さといった衝撃波の物理量に依らずに成り立つことも確認され、NLDSA 理論においてはモデルによらず普遍的に成り立つものであると主張している。

第三章では、NLDSA における大振幅波動の励起・散逸の効果を議論している。この章では宇宙線のエネルギースペクトルのふるまいについても調べるため、宇宙線の運動論効果をとりにれたモデルを用いている。二章の 2 流体モデル同様、この運動論モデルも多くの先行研究において取り扱われてきたものであるが、本論文では新たに宇宙線と熱的プラズマ間で起こるプラズマ不安定によって励起される波動と、その散逸をモデルに取り入れた。この新たな枠組みにおける時間定常解を数値的に求めることに成功し、その性質をパラメータ調査によってくまなく調べた。その結果、波動励起の効果によって、定常状態における宇宙線の生成率は減少することが分かった。特に高効率な解においてエネルギー密度で 6 割程度まで減少していた。また、波動のエネルギー散逸量が増加すると、さらに生成率が減少することが明らかになった。これらの減少は、波動の励起のために宇宙線のエネルギーが費やされたことにより、宇宙線圧力が減少し、結果的に衝撃波全体

の圧縮比が減少したことに起因している。宇宙線のエネルギースペクトルの傾きは衝撃波の圧縮比に依存しており、衝撃波全体の圧縮比の減少は特に高エネルギー領域におけるスペクトルの急峻化に寄与している。このため、宇宙線生成が抑制されたと議論している。波動の散逸による熱的プラズマの加熱は、局所的な音速の増大とそれに伴う実効的なマッハ数の減少を引き起こし、更に圧縮比を減少させていた。以上の結果は種々の物理パラメータによらないことも確かめられている。

第四章は、本論文の結論を述べている。二章において古典的 NLDSA 理論において、3つの定常解のうち、最も効率の低い解が選択される、という新たな指摘をし、三章において、超新星残骸衝撃波において頻繁に見られる磁場増幅の効果を加味した新たなモデルにおいて、衝撃波の物理パラメータによらず宇宙線生成が抑制されるという事実を明らかにした。以上の結論は、NLDSA に基づいて行われた研究結果に基づく従来の主張を注意深く扱うことを促し、かつ、宇宙線生成機構に関して新しい理解体系の構築していく上で新機軸をなすものであり、その意義は大きい。

なお、これら研究は星野真弘、天野孝伸との共同研究であるが、論文提出者が主体となって数値計算及び解析を行っている。したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。