

# 論文審査の結果の要旨

氏名 花山 秀和

本論文は、4章と Appendix からなる。第1章は導入部である。この章では、まず、宇宙の様々な階層構造のうち、特に銀河・銀河団に検出されている磁場の起源が不明であることを指摘し、様々な解決の試みがあることを簡潔にまとめて述べるとともに、銀河磁場の生成過程として本論文で注目するピアマン機構について解説している。ピアマン機構とは、電子の圧力勾配と密度勾配が平行ではないことが原因となって、磁場のない状態から磁場が生成される機構である。宇宙の構造形成過程で初代天体にあたる種族 III 星の超新星残骸のシェルの膨張過程でも、非一様に分布するガス雲と衝撃波との相互作用でピアマン機構が働きうる可能性を論じている。さらに、ピアマン機構による磁場生成を数値計算によって研究する場合、電子温度の緩和過程を磁気流体方程式と結合させて解くことの重要性を強調し、本論文での新しい試みと目的を明確にしている。

第2章では、まず、ピアマン機構の基本的なプロセスを調べるために構築した超新星残骸の軸対称 2 次元磁気流体力学数値計算コードと、空間および時間の二次精度を達成するために用いた計算スキームを詳しく論じている。さらに、磁場の発散の誤差を補正するための新しい計算手法や、衝撃波面で発生するカーバンクル不安定性を回避するために独自に加えた改良点等を説明している。この種の数値計算では 1 パーセクを下回るスケールの局所的な粒子計算を行う必要があるため、構築した数値計算法の適用範囲を注意深く同定し、衝撃波遷移領域を除く超新星残骸内部での磁場生成のみを計算対象とすることが述べられている。従って、磁場エネルギー等の計算結果は超新星残骸で生成されると期待される値の下限值を与えるものである。次に、構築した数値計算コードを用いて超新星残骸の衝撃波とガス雲との相互作用を数値的に解いた結果、典型的な爆発エネルギー $10^{51}$  エルグの超新星残骸の内部では動径方向の圧力勾配とそれに垂直な方向の密度勾配が出現し、ピアマン機構によって  $10^{-16}$  ガウス程度の磁場が生成されること、磁場エネルギーの総量は  $10^{24}$  エルグ程度となることを明らかにした。また、解析的な評価を行って、数値計算による結果の妥当性を確かめた。

第3章では、重元素を含まない種族 III 星と、ある程度宇宙進化が進んで重元素を蓄

積し始めた段階で生まれた種族 II 星の超新星に相当する爆発エネルギーを仮定し、星間ガス雲の平均密度に対して 2 倍程度の密度ゆらぎを持つ非一様なガス分布を与えて、ゆらぎのスケールと振幅をパラメータとして、超新星残骸の衝撃波とガス雲との相互作用に関する計算を行った。初期の超新星残骸に関しては、衝撃波通過後の星間ガスの電子温度がクーロン散乱によって緩和されない可能性があることが指摘されていたため、電子温度の緩和過程を他の物理量の進化と同時に解き、実際の電子温度から磁場の生成過程を計算し、移流に関しては MUSCL 法を適用した時間および空間の二次精度の差分法により数値流束を計算した。その結果、超新星残骸の衝撃波中では電子温度が緩和に到達した後に  $10^{-17}$  ~  $10^{-18}$  ガウスの磁場が生成され、磁場エネルギーの総量は  $10^{25}$  ~  $10^{26}$  エルグ程度となることを明らかにした。生成される磁場のパラメータ依存性としては、超新星の爆発エネルギー、ゆらぎの振幅とは正の相関があり、星間ガスの平均密度、ゆらぎのスケールとは負の相関があることがわかった。さらに、内部の圧力勾配および密度勾配に関する解析的な評価を行い、生成される磁場強度とエネルギー総量の時間進化を説明するスケール則を導いた。種族 III 星および種族 II 星の生成率を考慮して、宇宙全体で平均化した磁場のエネルギー密度は  $10^{-42}$  エルグ/cm<sup>3</sup> 程度となり、原始銀河では  $10^{-39}$  エルグ/cm<sup>3</sup>、 $10^{-19}$  ガウス程度の磁場と見積もることができる。この値は、ダイナモ機構による増幅で銀河磁場を説明しようとする場合に必要とされる種磁場として十分な値である。本研究により、種族 III 星と種族 II 星の超新星残骸が銀河磁場の起源として同程度に寄与することが明らかにされ、宇宙の構造形成過程における初代天体・種族 III 星の超新星残骸がその有力候補の一つであることが示された。本論文の結果はガンマ線バースト光源の偏角観測によって将来直接検証できる可能性があり、今後の観測が期待される。

以上のように、本論文では、銀河磁場の起源に関して新しい知見が得られ、将来の天文観測に資する手法も提示されていて、高く評価できる。

なお、本論文の内容は富阪幸治、高橋慶太郎との共同研究である。しかし、論文提出者が主体となって行ったもので、研究成果は論文提出者を第一著者とする論文としてまとめて発表する予定であり、論文提出者の寄与は十分であると判断できる。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。