

論文審査の結果の要旨

氏名 石崎 渉

本論文は6章および補遺からなる。第1章はイントロダクションとして、パルサーおよびパルサー星雲について、その構造や特徴など、近年の多波長観測により明らかになった事柄を紹介する。大質量星が進化の最終段階に重力崩壊し、その中心に高速で自転する中性子星（パルサー）を残すことがある。パルサーからは相対論的な速度で電子・陽電子が放出され、周辺の星間物質との相互作用により衝撃波形成や粒子加速など様々な現象を引き起こす。こうしてパルサー周辺には電波からガンマ線にいたるまで広い周波数帯の電磁波を放出するパルサー星雲が形成される。第2章ではパルサー風放出やパルサー星雲形成の基礎理論を解説する。

第3章では、パルサー星雲構造と放射の標準的な理論モデルと考えられている Kennel-Coroniti (KC) モデルを紹介し、パルサー風の定常性などのモデル仮定や適用条件について詳細に検討する。パルサー星雲内では、衝撃波で加速された高エネルギーの電子・陽電子が外側へと伝搬する間にシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱過程により X 線を放射する。電磁波放射により電子・陽電子はエネルギーを失うため、KC モデルでは X 線放射領域はパルサー風周辺の 1 pc 程度の領域に限られる。しかし最近の X 線観測により、複数のパルサー星雲で X 線の放射領域が電波の放射領域と同程度に広がっていることが確認された。ここで研究の目的が具体的に提起される。本論文では星雲全体にわたるような大きな領域から X 線が放射される物理機構を理論的に明らかにしようとする。論文提出者ははじめに、KC モデルに基づいて複数のパルサー星雲構造を解析し、磁場の強度や衝撃波半径などのパラメータを探索した上で、星雲分光スペクトルと放射領域の広がりを同時に説明することはできないと結論する。

第4章では一つの可能性として非定常モデルを考案する。はじめに相対論的磁気流体力学の基礎方程式を書き下し、電子・陽電子のエネルギー方程式に放射冷却の効果を取り入れる。星雲内の相対論的プラズマと周辺の星間ガスの状態方程式の違いも陽に取り入れて計算を行い、プラズマの速度や圧力、磁場強度の分布とその時間変化を求めた。かに星雲に対して 3000 年の進化を追った計算結果を定常モデルの結果と比べ、星雲内平均磁場強度や外縁部プラズマの速

度に二倍程度の差が生じることを明らかにした。これは、非定常モデルでは周辺物質との相互作用のために速度や磁場強度が時間変化するためと論じている。しかしいずれのモデルも星雲スペクトルや空間構造はほぼ同じ結果を示し、星雲構造の非定常性により X 線放射の拡がりを説明するには至らないと結論する。

ここまでの結果を考察し、論文提出者は星雲内で高エネルギー粒子が拡散することにより外側領域で X 線放射を引き起こす可能性を検討する。そこで第 5 章では、粒子拡散を考慮したこれまでの研究を総括し、拡散過程が流体に及ぼす反作用を整合的に扱う定式化を行った。3C58 や G21.5-0.9 に対して適切に設定し、得られた流体方程式を数値計算した結果、星雲の分光スペクトルとともに X 線放射の面輝度分布も再現するモデルを構築することができた。ただしこのモデルでは粒子拡散係数として、発達した乱流磁場を介して可能となるような大きな値を採用することが必要である。

第 6 章では、前章までに得られた結果をもとに、有力なモデルとして採用したような強い拡散効果がある場合には、高エネルギーの電子・陽電子が選択的に流出してパルサー星雲の外側に大きく拡がり、逆コンプトン過程によりガンマ線を放射しているはずであると結論する。

補遺では相対論的磁気流体力学の基礎的事項と各種放射過程を詳細に記述し、本論文第 5 章で用いた理想 MHD 近似の妥当性を示している。

なお、本論文第 4 章は田中周太氏、寺澤敏夫氏、浅野勝晃氏との共同研究をもとに、また第 5 章のパルサー星雲放射の磁気流体モデルに関する部分は川口恭平氏、浅野勝晃氏との共同研究をもとにしている。粒子拡散過程を磁気流体力学に取り入れて星雲の空間構造を説明するという着想は論文提出者本人が得たものである。さらに拡散過程の定式化から数値計算結果の解析まで論文提出者が主体的に行った。パルサー星雲 3C58, G21.5-0.9 に対する結果は全て論文提出者が計算し、考察を与えたもので論文提出者のオリジナルな成果である。

パルサー星雲放射の物理機構はその詳細が明らかにされておらず、宇宙物理学に残る謎の一つである。本論文は星雲スペクトルと X 線放射の空間的拡がりに着目し、非定常磁気流体力学計算により粒子拡散の効果を明らかにした。パルサー星雲の放射機構に迫る重要な研究成果であり、将来の X 線およびガンマ線望遠鏡を用いた観測に大きな示唆を与える。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。