

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博士（理学）	氏名	加藤 祐悟
学位授与の要件	学位規則第4条第1・2項該当		
論文題目			
<p style="text-align: center;">Global Current Circuit Structure in a Resistive Pulsar Magnetosphere Model (電気抵抗を含むパルサー磁気圏モデルの大域電流回路構造)</p>			
論文審査担当者			
	主査	教授	小嶋 康史
	審査委員	教授	大川 正典
	審査委員	教授	深澤 泰司
〔論文審査の要旨〕			
<p>パルサーの発見後比較的短い期間で、その天体は自転する強い磁場をもつ中性子星であることが確立した。現在では観測された天体数は数千にも増し、初期の発見に寄与した電波だけでなく、可視光やX線・ガンマ線でもパルサーからの放射が捉えられる場合もある。星の回転エネルギーを源として、広い電磁波長帯域における光源となり、またその周辺に存在するパルサー風星雲において粒子加速するエネルギーとして運ばれている。このように、様々な観測を通じて中心天体のパルサーの性質が明らかになっており、これら観測を説明するために磁気圏構造を理解する必要がある。強い磁場と星の自転による磁気単極誘導モデルで、おおよそのエネルギー放出率が理論的に見積もれるが、それを超える詳細なモデルは具体的に示されていない状況である。例えば、パルサー表面では強い磁場のため、電子・陽電子のプラズマが生成されているが、それらの大域的な流れがどのようになるかは未解決である。星表面から離れるにつれ、これらのプラズマの流れにより双極子磁場から電磁場構造が変化する。光円柱（ライトシリンダー）と呼ばれる領域より外の部分では電磁場的なエネルギー流（ポインティングフラックス）が生じていると考えられている。さらに、この電磁場の構造がプラズマの運動や放射に影響を与える。このようにパルサー磁気圏の大域的構造をプラズマ流の運動と電磁場構造を無矛盾に解く必要がある。その解法が困難なことにより、単純なモデルでの理解に留まる状況である。また、観測と合わせるため、状況に応じた放射機構を取り入れる必要もあり、観測データと比較するには理論モデルには不定性が多数含まれている。</p> <p>パルサー磁気圏を理論的手法のひとつにプラズマを粒子的に取り扱い、それらを源として電磁場とプラズマの運動の時間進化を解く方法があるが、計算資源の制限上、現実的な物理的パラメータから離れたものとなっている。より簡単な手法である、フォースフリー近似で大域的な電磁場構造が決められているが、数値結果に電流シートなど特異な構造が現れるなど、この手法を全空間領域に適応することの妥当性が問題になる。そこで、申請者は散逸効果を重要視し、ある種の電気抵抗を考慮したモデルを用い電磁場だけを時間発展させる手法で研究した。論文では先行研究で考えられた、電気伝導度モデルに空間場所に依存したモデルを導入した。それを用いて軸対称の二次元球座標系でマクスウェル方程</p>			

式と組み合わせて解き、時間発展させ自己矛盾がない定常な解を得ることに成功している。得られた数値解から磁気圏構造、電場、電流密度分布の大域構造を解析している。特に、形成された子午面の電流（ポロイダル電流）の閉回路構造を詳細に調べている。モデルとして導入した電気伝導度が増加するに従って、回路構造がより外側へ向かって拡大すると同時に光円柱から、外に向かうポインティングフラックスの減少率はより小さくなるという関係を見出している。電流回路構造の拡大と電磁エネルギー輸送の対応関係が明確にしたと結論している。計算に用いた電気伝導度の大きさは現実的な値にはほど遠く、計算の都合上、その値は小さな範囲に限られている。しかし、そのパラメータの依存性から外挿すると、現実的と思われる場合には光円柱から非常に遠方まで広がっていることが示唆される。あるいは、この論文で仮定した程度の非常に大きな異常電気抵抗がプラズマの性質により生成されるかもしれない。その場合、この論文のシミュレーションしたように、星に比較的近い場所で電磁気学的エネルギーが粒子の運動エネルギーに変換していることになる。いずれにしても、今後何らかの散逸機構を同定したモデルと組み合わせることで、パルサー磁気圏構造の理解に進むと考えられる。また、本研究手法は粒子法やMHDの数値計算と相補的であり、異なるものを組み合わせることでパルサー磁気圏の理解やモデル構築にも役立つ可能性がある。中心のパルサーからエネルギーが外部へ輸送され、どこかで散逸されるはずである。本論文では、電気抵抗を含め、その過程（大域的な電流の閉回路構造）をモデル化したものである。パルサー磁気圏を解明する研究論文はこれまで非常に数多く出版されているが、本論文の手法とそれに基づく結果は独特なものとなっており、新たな知見を与えるものである。

公表論文は単著で米国天文学会誌から既に発行されている。その内容の学術的価値が高いとともに、申請者の関連分野での十分な学識と研究の独創性が示されているのは明らかである。また、参考論文で示されるように、これまでにいくつかの宇宙物理学の理論的課題でも業績を上げていることでその実力が示されている。

以上の審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

Global Current Circuit Structure in a Resistive Pulsar Magnetosphere Model

Yugo E. Kato, The Astrophysical Journal(2017), 850:205

参考論文

(1) Kick velocity induced by magnetic dipole and quadrupole radiation

Yasufumi Kojima and Yugo E. Kato

The Astrophysical Journal(2011), 728:75

(2) Relativistic magnetic reconnection at X-Type neutral points

Yasufumi Kojima, Junpei Oogi, and Yugo E. Kato

Astronomy & Astrophysics (2011), 531, A47

(3) Numerical simulation of oscillating magnetospheres with resistive electrodynamics

Yasufumi Kojima and Yugo E. Kato

Progress of Theoretical and Experimental Physics (2014),023E012