

# 論文内容要旨 (和文)

平成 16 年度入学 大学院博士後期課程 地球共生圏科学専攻 天体物理学講座

氏名 中村 雄史 

論文題目 Diagnosis of the Disordered Magnetic Field in the Pulsar Powered Nebulae  
by use of Polarized Synchrotron Radiation

(シンクロトロン偏光を用いたパルサー星雲の乱れた磁場の診断)

太陽質量の 8 ~ 30 倍程度の星は、その一生を終えるとき超新星爆発を起こし、その中心にさまざまなタイプの中性子星をつくる。中性子星は主に中性子からなり、星半径が 10km 程度、質量が太陽質量の 1.4 倍程度の超高密度な天体である。この中性子星の中には、パルス状の放射が観測される "pulsar" が存在する。pulsar の自転周期は数秒から数ミリ秒という高速回転しており、pulsar の持つ磁場の典型的な強度は  $10^{12}$  gauss である。

pulsar の周囲には超新星残骸 (SNR) や星間ガスが取り囲んでいる。pulsar の高速回転により吹き出された超相対論的な plasma の流れ (pulsar wind) が、周囲のガスとぶつかり reverse shock と forward shock の 2 つの衝撃波を形成する。pulsar wind が reverse shock を通過すると plasma 粒子は熱化され、高エネルギーまで加速される。この相対論的速度をもつ plasma 粒子が、ランダム運動をし強いシンクロトロン放射を出しながら nebula flow として星雲の外側へと流れていく。これは pulsar 周辺で明るく輝く雲のように観測される。このような星雲のことをパルサー星雲 (pulsar wind nebula) と呼び、その代表格が "かに星雲 (Crab Nebula)" であり、最もよく観測されている。

Crab Nebula 内の荷電粒子は、 $10^{12}$  eV 以上の高エネルギーに加速される。また、地球に降り注ぐ陽子を主成分とする高エネルギー宇宙線は、そのエネルギースペクトルが  $10^{20}$  eV の大変高いエネルギーまで、すそが伸びている。これほどまでに高いエネルギーをもった粒子がなぜできるのか、その加速メカニズムの解明は宇宙物理学の重要な基本問題の一つである。

1984 年、Kennel & Coroniti によって Crab Nebula の標準モデルが提唱された (KC model)。彼らは pulsar wind の加速効率を表わすパラメータ  $\sigma$  を定義した。 $\sigma$  は pulsar wind の poynting energy flux を粒子の kinetic energy flux で割ったものである。彼らは、星雲の膨張速度、光度、スペクトルから  $\sigma = 0.003$  と決定した。

2003 年、KC model のモデルをもとに Shibata et al. (2003) が X-ray 領域での 2 次元イメージの再現を試みた。彼らの再現したイメージは、Chandra によって観測されるイメージが Ring 型であるという事実にもかかわらず、Nebula の長軸側での pitch 角効果のため Lip 型イメージとなった。このことから彼らは、(a) Crab Nebula 内の磁場はトロイダルな揃った磁場ではなく乱れていること、(b) pulsar wind は kinetic energy flux が卓越している ( $\sigma \sim 10^{-3}$ ) と従来では考えられていたが、poynting energy flux が予想以上に大きい可能性があること、(c) Nebula 内での magnetic reconnection 等による加熱・加速の可能性があること、を示唆する結果を示した

近年、Pulsar Wind Nebula の相対論的な数値実験が軸対称 2 次元のもとで行われている (Komissarov & Lyubarsky 2003, Del Zanna et al. 2004)。これらの数値実験では、回転軸の子午面内で複雑な流れの構造があるものの、全て純粋なトロイダル磁場を仮定している。これらの場合では、Nebula 全体の平均偏光度はとても高く、観測とは一致しない。観測を説明するためにはやはり 3 次元的な乱れた磁場が必要である。

また Crab Nebula の X 線偏光観測 (Weisskopf et al. 1978) が 2.6keV では偏光度  $P = 19.2\%$ 、 $P.A. = 156^\circ.4$ 、5.2keV では偏光度  $P = 19.5\%$ 、 $P.A. = 152^\circ.6$  であることが知られている。さらに可視光観測 (Oort and Walraven 1956) でも偏光度  $P = 19\%$ 、 $P.A. = 162^\circ$  であることが知られている。

これらを受け、本論文では、expanding disc model を用いて、Crab Nebula の偏光計算を行った。KC model ( $\sigma \sim 0.003$ ) によると、Nebula 内のプラズマの分布関数と磁場のエネルギー密度は pulsar からの距離の関数で記述できる。過去の研究とは異なり、乱れた磁場を磁場のエネルギー密度の比として与えた。一様磁場はトロイダルとし、Flow のダイナミクスは解いていない。我々の計算では、Nebula

(10pt 2,000字程度 2頁以内)

氏 名  沖村 雄史

flow は相対論的運動をしているため、偏光を記述するパラメータの Lorentz 変換を考慮に入れている。

Nebula 全体の平均偏光度を、天空面と Nebula 軸とのなす角と、乱れた磁場のエネルギー密度比の関数として得た。その結果 Crab Nebula において、乱れた磁場の成分は磁場のエネルギー密度のうち 60 % 含まれることが分かった。この値は、観測される intensity map が Lip 型ではなく Ring 型で現れるという事実により支持され、また、Nebula の Ring において最大偏光度が約 40 % であり観測とよく一致していることから支持されている。

この乱れた磁場は磁気張力よりも磁気圧に寄与するため、磁場のピンチ効果が過去の RMHD の研究では過大評価されてきたと考えられる。Lyubarsky によって提案されていた反平行の磁場の崩壊が、実際に起こっているかもしれない。Nebula の front-back コントラストから得られた相対論的な flow の速度は、偏光の position angle と depolarization の分布の非対称性から検出可能である。

# 学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 20年 2月 8日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主 査 ..... 柴田 晋平 ..... 印  
副 査 ..... 櫻井 敬久 ..... 印  
副 査 ..... 佐々木 実 ..... 印  
副 査 ..... 印

学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

## 1. 論文申請者

専攻名 ..... 地球共生圏科学専攻  
氏 名 ..... 中村 雄史

## 2. 論文題目 (英文の場合は, その和訳を併記すること。)

..... Diagnosis for the Disordered Magnetic Field in the Pulsar  
..... Powered Nebulae by use of Polarized Synchrotron Radiation  
..... (シンクロトロン偏光を用いたパルサー星雲の乱れた磁場の診断)  
.....

## 3. 審査年月日

論文審査 ..... 平成 20年 1月 23日 ~ 平成 20年 2月 8日  
論文公聴会 ..... 平成 20年 2月 8日  
場所 ..... 理学部地球科学棟 23番教室  
最終試験 ..... 平成 20年 2月 8日

## 4. 学位論文の審査及び最終試験の結果 (「合格」・「不合格」で記入すること。)

(1) 学位論文審査 ..... 合格  
(2) 最終試験 ..... 合格

## 5. 学位論文の審査結果の要旨 (1,200字程度)

別紙のとおり

## 6. 最終試験の結果の要旨

別紙のとおり

専攻名	地球共生圏科学専攻	氏名	中村 雄史
学位論文の審査結果の要旨			
<p>本論文は以下のように構成されている。第一章では、研究対象である回転駆動型パルサーとその周りの星雲について導入し、第二章で、パルサー星雲の過去から最近の観測結果がのべられている。とくに、論文で扱う偏光観測について詳しく述べられている。第三章では、パルサー星雲を理解するための理論モデルについて過去から最新のモデルまでがまとめられている。これらを踏まえて、パルサー星雲を理論的に理解するためには乱流磁場の存在が疑われることが示されている。乱流磁場の存在とその定量的な大きさの見積もりのために、偏光を利用することが提案され、その理論モデルの構築を第四章で行っている。第五章ではモデル計算の結果と第二章で述べられた観測結果との比較がなされている。第六章は、まとめと議論である。本研究では、パルサー星雲をいろいろな角度で見たとき得られる偏光度を乱流磁場の大きさの関数として与えている。これは世界で初めての結果であり、これを応用してパルサー星雲の典型例である「かに星雲」における乱流磁場はエネルギー密度で測って60%であることを示した。この乱流磁場とかに星雲の相対論的な膨張速度をあわせると観測されるX線の画像とも非常に良くあうことがしめされている。また、非常に相対論的な場合、偏光面は磁場と垂直ではなくなることを指摘している点も注目される。</p> <p>本研究の一部は、英国の天文学専門誌 Monthly Notices of Royal astronomical Society, Vol. 381 (2007), pp1489-1498 に、“Polarization of the Crab Nebula with disordered magnetic components”のタイトルで掲載されている。</p> <p>以上、本論文は理学博士の学位にふさわしい研究成果としてまとめられており、審査結果は合格と判断される。</p>			
最終試験の結果の要旨			
<p>学位論文の内容を口頭で発表し、研究および宇宙物理学についての口答試問をおこない、学位にふさわしい知識および解析力があることが確かめられた。発表の態度および研究の姿勢も学位にふさわしいものであると判断された。</p> <p>以上によって、最終試験の結果は合格と判定される。</p>			