

# 論文内容要旨 (和文)

平成21年度入学 大学院博士後期課程

地球共生圏科学専攻

物理分野

氏名 結城 伸哉



論文題目 A Particle Simulation for the Pulsar Magnetosphere: Relationship of Acceleration Regions (パルサー磁気圏の粒子シミュレーション: 粒子加速領域の相互関係)

パルサーからの放射を説明する有力な粒子加速モデルとして polar cap (PC)、slot gap (SG)、そして outer gap (OG) がある。PCモデルではパルサー磁極上空に粒子加速領域を考える。ガンマ線放射がPC起源である可能性はMAGICやフェルミガンマ線天文衛星による近年の観測から否定されているが、電波放射は主にこの領域から来ているものと考えられている。SGはPCの端を拡張したようなモデルであり、主に高エネルギー放射を説明する。星表面から光半径付近まで広がった放射領域を持ち、last open field line上に位置する。OGは基本的にヌル面と光半径に挟まれた領域に位置し、高エネルギー放射を説明するモデルである。PC、SG、OGモデルはすべて沿磁力線電場による加速を考えている。この電場を計算する際には  $-\nabla^2\Phi = 4\pi(\rho - \rho_{GJ})$  という形式のPoisson方程式がしばしば用いられる。ここで  $\Phi$  は非共回転ポテンシャル、 $\rho$  は電荷密度、 $\rho_{GJ}$  はGoldreich-Julian電荷密度を表す。このPoisson方程式を解くためには境界条件が必要であり、これらのモデルでは壁において  $\Phi=0$  という境界条件が課されている。境界条件は加速電場の構造に影響するため非常に重要であるが、この  $\Phi=0$  となる領域、いわゆるデッドゾーンが本当に存在するかはあまりよく研究されていない。また、電流の向きについて考えると PC・SGモデルでは磁力線に沿って内向きに、OGモデルでは外向きに電流が流れるということになっている。しかし、どのモデルも全て同じデッドゾーンの上にあると考えると、これらの電流の向きに矛盾が生じる。そのためPC・SGとOGは共存できないと考えられる。一方、観測によって得られている電波・ガンマ線の光度曲線はPCからの電波放射、とSGもしくはOGからのガンマ線放射によってよく説明されることが分かっている。そのため、観測によって得られた光度曲線をうまく再現するためにはこれらの粒子加速モデルが共存している必要がある。

そこで我々は(1)デッドゾーンは本当に存在するのか(2)PC・SGとOGは共存できるのかという問題を解決するため、パルサー磁気圏全体を扱う粒子シミュレーションを行った。粒子シミュレーションを用いれば、加速電場やデッドゾーンの形成を含む磁気圏全体の構造を調べることが可能となる。さらに、粒子一つひとつの運動を解くため、ドリフトによって磁力線を横切るような運動も扱うことができる。このようなシミュレーションでは相互作用の計算量が問題になってくるが、クーロンの法則やビオ・サバルの法則は重力と同様に逆二乗則で表されるため、重力多体問題専用計算機GRAPEを用いて高速に計算することが可能である。今回のシミュレーションではクーロン力だけでなく磁気圏電流が作る磁場も考慮して計算を行った。

シミュレーションでは以下のことを仮定している。(1)星は回転軸と磁化軸が揃った導体球であるとする(2)粒子は星表面から自由放射される(3)粒子は曲率放射の反作用を受ける(4)沿磁力線電場  $E_{\parallel}$  が強い位置で電子陽電子対生成を行う。我々のシミュレーションでは表面電荷を粒子に置き換え、 $E_{\parallel}$  によって粒子が加速され磁気圏に広がっていく様子を追い、定常解を探す。その大まかな流れは以下のようになっている。(1)真空の状態から計算を始める(2)表面電荷を粒子に置き換えて放出

する (3) 粒子一つひとつの運動方程式を解く (4)  $E_{||}$  が大きい位置に電子用電子対を入れる (5) 外部境界から出た粒子・星へ戻った粒子の消去、近接粒子の対消滅を行う (6) 定常状態になるまで 2 から 5 のステップを繰り返す。




このようなシミュレーションを行った結果、デッドゾーンは確かに存在することがわかった。また、従来の描像とは異なり赤道面付近だけでなく、外向きと内向きの電流の境界にあたる中緯度付近にも  $\Phi=0$  となる領域 (current-neutral zone) が形成されることがわかった。この結果は、current-neutral zone の上に PC・SG、下に OG が位置することにより異なる向きの電流が流れる粒子加速領域がうまく住み分けし、共存できる可能性があることを示唆する。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成24年 2月 2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  ⑤  
副査 櫻井敬久  ⑤  
副査 齋藤 和男  ⑤  
副査 ..... ⑤  
副査 ..... ⑤  
副査 ..... ⑤

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 結城 伸哉

2. 論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記する。)

A Particle Simulation for the Pulsar Magnetosphere:  
Relationship of Acceleration Regions  
(パルサー磁気圏の粒子シミュレーション: 粒子加速領域の相互関係)

3. 審査年月日

論文審査 平成24年 1月25日 ~ 平成24年 2月 2日  
論文公聴会 平成24年 2月 2日  
場所 理学部 23番教室  
最終試験 平成24年 2月 2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。)

(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

別 紙

専攻名	地球共生圏科学専攻	氏名	結城 伸哉
学位論文の審査結果の要旨			
<p>学位論文の概要は以下のようである。</p> <p>(第一章) パルサー (超強磁場(10<sup>8</sup>T)を持った高速に自転する中性子星) の発見の歴史から、この星が非常に特異な放射を出すことを議論し、その放射のメカニズムおよびそのバックグラウンドとなる磁気圏の構造の問題のありかを指摘している。</p> <p>(第二章) 特異な放射のうちでも非常にエネルギーの高いガンマ線放射について、ごく最近のフェルミガンマ線宇宙望遠鏡の成果を整理し、放射機構や磁気圏構造を解明するヒントを探しだす。</p> <p>(第三章) ガンマ線放射やパルサー風、電波放射など総合的に考えて理論的にパルサーという現象をどう考えるか、パルサー磁気圏の理論モデルの基本について議論している。</p> <p>(第四章) 理論に基づいて、磁気圏構造を解明するためのシミュレーションの方法について議論している。特に、第一原理からパルサーの構造や粒子加速機構を解明するための方法として、粒子シミュレーションの方法を開発し記述している。また、通常の計算機ではできない大規模計算機になるため重力多体問題専用計算機を利用する方法がとれた。その方法についても述べている。</p> <p>(第五章) 実際に粒子シミュレーションを遂行した結果を与えている。とくに、目覚ましい結果としては、中緯度に星と同じ電位を持つ中立帯(current neutral dead zone)ができることを世界で初めて指摘した。また、新しく加えた電流による磁場構造の変化がプラズマの流れだしの促進をすることも示した。</p> <p>(第六章) 前章の結果を踏まえ、従来別々に提唱され相互の関係に矛盾があると思われていた3つの粒子加速モデル(極冠モデル(Polar Cap Model)、スロットギャップモデル、アウターギャップモデル)の相互関係を初めてあきらかにし、この三つの加速が共存する可能性を示した。最終章は全体のまとめである。</p> <p>この研究成果の大部分が日本天文学会欧文報告誌 2012 年第 64 巻 3 号 (6 月) 掲載されることが決まっている。</p> <p>以上の結果は、博士の学位にふさわしいと認められ、合格と判定される。</p>			
最終試験の結果の要旨			
<p>最終試験は、学位論文の内容の発表を行い、さらに、関連する科目、高エネルギー物理学、電磁気学、情報処理科学等を中心とし、口頭により行い、すべての分野にわたって十分な知識と理解力をしめしたことより、合格と判定される。</p>			