

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007 ~ 2009

課題番号：19540235

研究課題名（和文）

電氣的に非中性な磁気中性面における粒子加速と高エネルギー天文学への応用

研究課題名（英文）

Particle Acceleration in electrically non-neutral magnetic neutral sheet and application in high energy astrophysics

研究代表者

柴田 晋平 (SHIBATA SHINPEI)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：90187401

研究成果の概要（和文）：従来の研究では、電氣的に非中性である効果が議論されて来なかったことに注意し、本研究では、電氣的に非中性な磁気中性面の構造とそこに於ける粒子加速機構を明らかにすることを目的とする。この効果の研究によって従来の観測と理論の矛盾（問題）を解決することを目指す。

結果、開いた磁場と閉じた磁場の境界領域(Y-point)で間欠的なリコネクションを観察できた(2009年春の天文学会)。そこからのシンクロトロン放射が観測的に Fermi で得られているガンマ線の一部を説明できるかもしれないことをしめした。

また、衝撃波後方のシンクロトロン散逸、ピッチ角散乱の効果を観測データを用いて検討をした。特に、硬X線のカニ星雲の画像に見られる二つ目構造の再構成をおこなった。結果としてピッチ角の小さな粒子が卓越していると硬X線の観測を説明することを示し、これは従来のピッチ角が大きな粒子が多くなる衝撃波の通説を覆すこととなった。パルサー風の終端衝撃波においても磁気リコネクションが重要な働きをしていることが初めて示唆された。

今回検討された効果によっても運動エネルギーが卓越した相対論的な遠心力風をつくることができない。したがって、問題は解決しない。むしろ、今回発見された衝撃波内での磁気リコネクションは実は問題は存在しない、つまり、運動エネルギーは卓越する必要がないことを示唆している。

研究成果の概要（英文）： Previous study on the magnetic neutral sheet and the particle acceleration in it has been on cases for electric quasi-neutral plasma. In this study electrically non-neutral cases have been considered. We attempted to clarify the mechanism of particle acceleration in electrically non-neutral current sheet. This study may resolve long standing so called sigma-problem.

We have found quasi-periodic magnetic reconnection in the magnetic neutral sheet at the Y-point by using a newly developed particle-in-cell scheme (presented at annual meeting of astronomical society of Japan in 2009). This dissipation may explain the gamma-ray radiation from the pulsars observed Fermi gamma-ray telescope.

In addition to this, we examine the X-ray data which may be caused by synchrotron dissipation and pitch angle scattering. In particular, we have reproduced the hard X-ray image which showed double peaked image. We find that if high energy particles are dominated by ones with small pitch angles, then observation is reproduced well. This contradicts with the standard understanding of the post shock plasma. It is shown for the first time that the magnetic reconnection takes place in the termination shock of the pulsar wind.

It is suggested that the kinetic energy dominant wind is not produced in the relativistic centrifugal wind. Therefore, the sigma-problem cannot be resolved. We rather suggest that the magnetic reconnection in the shock convert the kinetic energy to thermal one so that there is no sigma-problem, i.e., the wind is not dominated by the plasma kinetic energy in bulk motion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：(1) 天文学 (2) 高エネルギー物理 (3) プラズマ (4) ガンマ線天文学

1. 研究開始当初の背景

従来の磁気中性面における粒子加速の研究では、電氣的に非中性である効果が議論されて来なかった。

相対論的な遠心力風の中で形成される磁気中性面では磁気力だけでなく電気力も重要な働きをする。これまでこの効果を陽に取り扱っていなかったことに盲点があった。

2. 研究の目的

本研究では、電氣的に非中性な磁気中性面の構造とそこに於ける粒子加速機構を明らかにすることを目的とする。この効果の研究によって従来の観測と理論の矛盾(問題)を解決することを目指す。

より具体的には、(1) 電気力が卓越した磁気中性面(あるいはその列)の構造および散逸過程を解明する。(2) 電氣的に優勢な磁気中性面と衝撃波との相互作用を調べ、衝撃波の粒子加速について新しいパラメータ領域、つまり静電場を持つ領域、を探查する。

3. 研究の方法

当初、解析的なアプローチをおこなったが、研究期間後半では円柱座標に適用できる粒子プラズマシミュレーションコード(Particle-In-Cell)を開発し、このコードを用いて研究した。境界条件を工夫して、円柱状のプラズマ全体が軸の周りに回転している効果を入れた。このような回転プラズマにたいする PIC simulation は従来なかったもので、本研究によって初めてなされた。

また、圧力の非等方性をいれた衝撃波に関

する基礎方程式を得た。

4. 研究成果

結果、開いた磁場と閉じた磁場の境界領域(Y-point)で間欠的なリコネクションを観測できた(2009年春の天文学会)

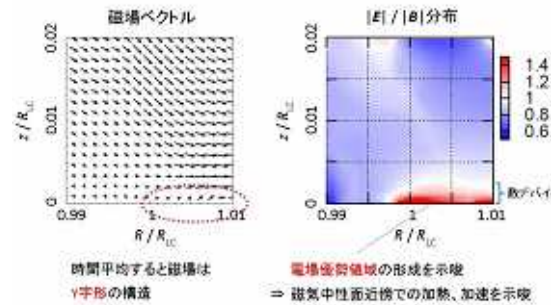


図1 磁気中性面では磁気リコネクションが生じ、プラズマの熱化が生じている(右パネル赤い部分)。磁場の平均的な構造は予想通りY型をしている。

磁気リコネクションの駆動力は遠心力である。PICの円柱座標への適用で遠心力(円柱状の回転)の効果を入れた相対論的なプラズマのシミュレーションは私たちの知る限り初めての成功である。

そこからのシンクロトロン放射が観測的にFermi で得られているガンマ線の一部を説

明できるかもしれないことをしめした(図2参照)。今後は、この放射がパルス位相のどの部分で観測されるかを検討したい。

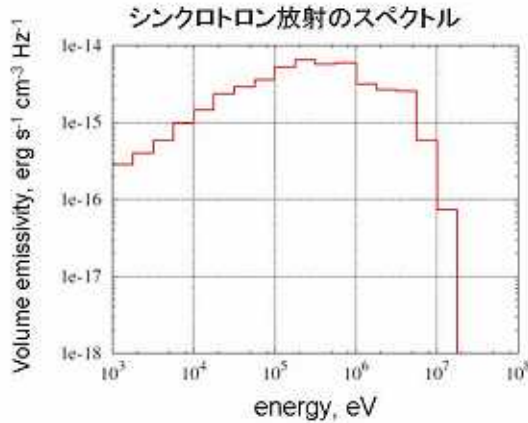


図2 Y - pointからの予想されるスペクトル。

上記の遠心力風においては斜め回転の効果により磁気圏内には回転によって折りたたまれた多数の磁気中性面が形成される。これはやがて終端衝撃波を形成する。もし、そこでさらに磁気リコネクションが生ずれば、粒子のピッチ角分布に非等方性ができるとよそうされる。そこで、ピッチ角の非等方性があるときのMHK方程式および衝撃波関係式の基礎方程式を確立した。



図3 左の観測された二つ目構造をシミュレーションで再現した(右図)

ピッチ角分布を探るために衝撃波後方の星雲の分析をおこなった。つまり、衝撃波後方のシンクロトロン散逸、ピッチ角散乱の効果を観測データを用いて検討をした。特に、硬X線のカニ星雲の画像に見られる二つ目構造の再構成をおこなった。結果としてピッチ角の小さな粒子が卓越していると硬X線の観測を説明することを示し、これは従来のピッチ角が大きな粒子が多くなる衝撃波の通説を覆すこととなった。

以上のピッチ核に関する示唆は従来原因

が不明だったカニ星雲のインナーリングのコントラストの問題を解決してくれるかも知れないということである。通常、強い相対論的な衝撃波の後方の速度は1/3 cである。しかし、この値ではインナーリングのコントラストは非常に大きくて、図4のような現実の小さいコントラストは理解できない。



図4 カニ星雲のX線画像

ところが、もし、ピッチ角がわれわれが予想したように小さければ磁場に垂直な圧力は少なく、衝撃波での圧縮が大きいので、大きな減速が得られる。これを新しい定式化によって得られた衝撃波関係式によって計算すると図5のような結果が得られた。

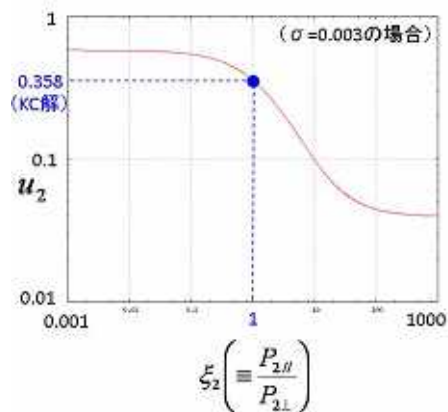


図5 衝撃波後方の流体の速さを磁場に平行な圧力と垂直な圧力の比の関数として求めた。

したがって、現実のカニ星雲では衝撃波後方の減速が激しく、その原因は衝撃波における磁気リコネクションであり、結果として磁場に平行な圧力が増加したと解釈できる。これはまったく新しい理解であり、同時に 問題

も解決できる可能性を含んでいる。つまり、パルサー風はもともと運動エネルギーが卓越しているわけではなく、磁気エネルギーも運動エネルギーと同程度に大きい、そして、衝撃波のリコネクションで磁気エネルギーから運動エネルギーに変換される。この効果を考えていなかった従来のモデルではパルサー風で既に運動エネルギーが卓越していたとみなしていた。それを問題といていたということになる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

1. Bamba A., Mori K., Shibata S., Chandra View of Pulsar Wind Nebula Tori, *Astrophys. J.*, 2010, 709, 507-511 査読あり
2. Umizaki M., Shibata S., Method of the Particle-in-Cell Simulation for the Y-point in the Pulsar Magnetosphere, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 2010, 62, 131-142 査読あり
3. Yatsu Y., Kawai N., Shibata S., Brinkmann W., Discovery of the Inner Ring around PSR B1509-58, 2009, *Publ. Astr. Soc. Japan.*, **61**, 129-135 査読あり
4. Takata T., Chang H. -K., Shibata S., Particle Acceleration and Non-Thermal Emission in Pulsar Outer Magnetospheric Gap, 2008, *Mon. Not. R. astron. Soc.*, **386**, 748-758 査読あり

[学会発表](計11件)

1. 結城伸哉、柴田晋平、和田智秀、海崎光宏、磁場の変形を考慮した粒子シミュレーションによるパルサー磁気圏におけるデッドゾーンの構造, 日本天文学会, 2010年2月26日, 広島大学
2. 大澤 健、柴田晋平, カニ星雲のダイナミクスにおける圧力の非等方性効果の研究, 日本天文学会, 2010年2月26日, 広島大学
3. 和田智秀、高田順平、柴田晋平, 中性子星磁気圏の三次元シミュレーション, 日本天文学会, 2010年2月26日, 広島大学
4. 柴田晋平、結城伸哉、海崎光宏、和田智秀、高田順平, グローバル磁気圏の粒子シミュレーションとフェルミ時代のパルサー磁気圏モデルの方向性について, 日本天文学会, 2010年2月25日, 広島大学
5. 海崎光宏、柴田晋平、結城伸哉, 粒子シミュレーションによるパルサー磁気圏での磁気中性面形成と高エネルギー放射に関する研究, 日本天文学会, 2010年2月25日, 広島大学

6. 柴田晋平, パルサー磁気圏研究の今後の展望, 宇宙線研究所共同利用研究会「高エネルギー宇宙物理学の将来とCTA」, 2010年1月9日, 東京大学宇宙線研究所

7. 柴田晋平, パルサー磁気圏のシミュレーションの最新の結果とカニ星雲に関するコメント, 高エネルギー物理に関する研究会, 2009年11月28日, 国民宿舎「みやじま杜の宿」

8. 柴田晋平, The Pulsar Magnetosphere, Nagoya University Global COE, international school, 2009年11月12日, 名古屋大学

9. 海崎光宏、柴田晋平、結城伸哉, パルサー磁気圏における Y-point 形成のシミュレーション2, 日本天文学会, 2009年9月14日, 山口大学

10. 結城伸哉、柴田晋平、和田智秀、海崎光宏, パルサー磁気圏における粒子シミュレーション, 日本天文学会, 2009年9月14日, 山口大学

11. 馬場 彩、森 浩二、柴田晋平, Chandraによるパルサー星雲 トーラスの観測, 日本天文学会, 2009年9月14日, 山口大学

[その他]

ホームページ等

<http://astr-www.kj.yamagata-u.ac.jp/shibata/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

柴田 晋平 (SHIBATA SHINPEI)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：90187401

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし