OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Interaction between Alternating Magnetic Fields and a Relativistic Collisionless Shock
Author(s)	永田, 健太郎
Citation	大阪大学, 2008, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1251
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

氏名	永田 健太郎（ながた けんたろう）
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記番号	第 21744 号
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第４条第１項該当 理学研究科物理学専攻
学位論文名	Interaction between Alternating Magnetic Fields and a Relativistic Collisionless Shock （反平行磁場と相対論的無衝突衝撃波の相互作用）
論文審査委員	（主査） 教授 高部 英明 （副査） 教授 小川 哲生　教授 常深 博 東京大学理学系研究科教授 星野 真弘　准教授 藤田 裕

論文内容の要旨

我々の宇宙には「非熱的スペクトル」を示す現象がありふれている。これは無衝突プラズマ中で粒子が盛んにエネルギーを得ている（加速されている）ことを示しているが、メカニズムは明らかではない。特に相対論的高エネルギー天体（パルサー星雲、活動銀河核（AGN）ジェット、ガンマ線バースト（GRB）など）でよく見られる。またこれらの天体では磁場から粒子へのエネルギー変換（磁気散逸）も問題となっているが、未解決である。

本論文ではこれら「粒子加速」と「磁気散逸」の問題を解決するために「衝撃波」と「反平行磁場」に着目した。衝撃波は超音速の流れが阻害されれば生成され、反平行磁場は乱れた磁場構造があれば見られる。共にありふれた現象である。そこで我々は数値シミュレーションを用いて、反平行磁場と相対論的無衝突衝撃波の相互作用の研究を行った。シミュレーション方法は粒子加速や磁気散逸を正しく扱うことのできる Particle-in-Cell（PIC）法を用いた。

相対論的衝撃波を扱う多次元 PIC シミュレーションでは、「Numerical Cherenkov Radiation」と呼ばれる数値現象が問題となる。この問題は電磁場を解く際に時間や空間の差分の影響で電磁波の位相速度が短波長領域で実際の電磁波より遅くなるため、粒子が電磁波より速く運動することでチェレンコフ光が発生するものとして理解されている。我々はこの問題の原因がこれまでの理解に加え、電流計算の際に生じるエイリアスの影響によっても生じることを明らかにした。さらに過去に提示されたスペクトル法の一種とエイリアスの影響を効果的に排除するフィルターを用いることで解決されることを示した。

次に１次元 PIC シミュレーションによって、反平行磁場と衝撃波の相互作用を調べた。その結果、衝撃波面から放射される precursor wave が電流層内の粒子を強く加速することがわかった。また電流層同士の間隔が衝撃波下流の典型的なジャイロ半径よりも小さい場合には、反平行磁場構造が衝撃波遷移層で消滅し、強い磁気散逸が起こる。これは磁気散逸によって磁気中性面の幅が最低でもジャイロ半径程度まで拡大するためである。一方で電流層の幅が広いときに衝撃波下流に大振幅の磁気音波が励起され、precursor wave によって加速された粒子がさらに加速されることがわかった。

最後に１次元での結果を踏まえ、２次元シミュレーションを行った。電流層の間隔がバルクのローレンツ因子と磁場によって定義されるジャイロ半径よりも小さい場合、一部の粒子は衝撃波面から上流へ逆流する。この逆流粒子と

上流のプラズマが Weibel 不安定性を引き起こし、衝撃波下流系で磁場と電場を励起する。我々はこの電場によって粒子が加速されることを発見した。特に電流層の間隔がジャイロ半径より小さく、かつ上流の平均磁場がゼロの場合、この Weibel 不安定が散逸を担って衝撃波が形成される。これは背景磁場なしの場合と同様で、1次元シミュレーションでは衝撃波は形成されない。Weibel 不安定性は1次元では実現されない多次元効果である。

我々は以上のような反平行磁場と衝撃波による粒子加速と磁気散逸のメカニズムを発見した。

論文審査の結果の要旨

宇宙の高エネルギー物理現象で重要な課題として特に磁場のエネルギーが無衝突衝撃波との相互作用を通して高エネルギー粒子のエネルギーに変換される物理機構の解明がある。本論文ではパルサーに代表されるコンパクト星から放出される超相対論的な電子陽電子プラズマ流が、無衝突衝撃波に衝突することにより、背景磁場のエネルギーがプラズマ流の熱エネルギーに効率よく変換される物理過程を明らかにしている。

カニ星雲のパルサーは表面に 10^{12} ガウス程度の磁場を持ちながら回転周期 33 ms で回転している。磁気軸と回転軸が異なるため、光速と回転周期の積で決まる光円筒半径～1600 km より外では、磁場は回転軸に垂直方向で、磁場の方向は 1600 km ごとに反転しながら外に広がっていく。このような反平行磁場に電子陽電子が凍り付いて、パルサー周りの1光年程度の距離にある残骸と衝突し、定在衝撃波が 0.4 光年（約 10^{15} m）の半径あたりに存在することが観測から分かっている。光円錐近辺で磁場のエネルギー密度が粒子のエネルギー密度の1万倍程度であったのが、衝撃波面を過ぎたところで 1/300 程度にまで減少している。1次元、2次元の粒子コード（PIC）を開発し、その磁気エネルギーの散逸機構とそれに伴う非熱的粒子加速の物理を、本論文では解明している。

1次元、2次元を通じて、回転の赤道面での物理過程と赤道から外れた部分での現象が大きく異なることを明らかにした。1次元のシミュレーションでは、赤道上では平均として磁場が打ち消しあうため、衝撃波は生成されない、しかし、赤道面外では、平均磁場が残るために衝撃波が形成され、同時に、衝撃波面で発生した電磁波の圧力により粒子が加速されることを見いだした。この電磁波による加速が非熱的粒子加速の原因と同定した。2次元のシミュレーションでは全く異なるシナリオが明らかとなった。赤道面では Weibel 不安定性という多次元が本質的な自己磁場形成により、無衝突衝撃波が形成され、その磁場に伴う波面方向の静電場が粒子を加速することを明らかにした。赤道面から外れたところでは、2次元では、衝撃波は形成され磁場の散逸は起こるが、粒子加速は見られなかった。

本来のパルサーでは計算時間にして電子プラズマ振動周期の 10^6 倍の時間の計算が必要であるが、2次元では電子プラズマ振動周期のその 100 倍程度、1次元で 1000 倍程度しか計算できない。これは計算機の能力による。その結果を 10^6 時間まで外挿すると

① 赤道上では Weibel 不安定に伴う無衝突衝撃波の生成と、自己磁場に伴う静電場による比熱的粒子加速が起こる。

② 赤道面から離れたとのとでは、1次元的な無衝衝撃波の生成が起こり、その際、衝撃波面で生成される電磁波が衝撃波面の先を走り、その電磁波の圧力により粒子が加速される。

ことを明かとした。

以上の成果は世界に先駆けた研究であり、高エネルギー宇宙物理学に多大に貢献する学術的成果である。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。