

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：12501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23840047

研究課題名（和文） 超並列版電磁プラズマ粒子コードを用いた高マッハ数衝撃波における電子加速の研究

研究課題名（英文） Studies on electron accelerations at high-Mach number collisionless shocks using a Particle-in-Cell code

研究代表者

松本 洋介（MATSUMOTO YOSUKE）

千葉大学・大学院理学研究科・特任助教

研究者番号：20397475

研究成果の概要（和文）：高マッハ数衝撃波の大規模 2 次元 PIC 計算を行い、イオン・電子質量比とアルヴェンマッハ数に対する電子加速効率の依存性の検証を行った。その結果、より現実的な質量比の下でも超高マッハ数領域では電子が効率的に加速されることが明らかになった。このことは、超新星残骸衝撃波において電子が効率的に相対論的エネルギーまで加速しうることを示唆する。

研究成果の概要（英文）：Large-scale 2D PIC simulations of collision-less shocks reveal that electrons are effectively accelerated by the electron shock surfing acceleration mechanism with using a large ion-to-electron mass ratio in a very-high Alfvén Mach number regime. The results imply that electrons can be accelerated effectively to relativistic energies at supernova remnant shocks.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線、衝撃波、粒子加速、大規模計算、PIC 計算

## 1. 研究開始当初の背景

超新星残骸（SNR）衝撃波は宇宙線の起源として認識されている。衝撃波における荷電粒子の標準理論として衝撃波統計加速（DSA）が知られているが、DSA によって電子を加速させるには、前段階としての加速メカニズムが必要とされてきた（電子注入問題）。その前段階加速メカニズムとして衝撃波波乗り加速が挙げられており、数値計算による検証が行われてきた。しかし、限られた空間（1次元）、パラメタ（マッハ数、イオン・電子

質量比）の下でしか議論できておらず、現実的な SNR 衝撃波のパラメタで効率的に働くかどうかは議論の余地を残していた。

## 2. 研究の目的

本研究では、より現実的な SNR 衝撃波のパラメタに迫って、多次元・高アルヴェンマッハ数領域 ( $M_A > 10$ ) での電子衝撃波波乗り加速の効率を明らかにすることを目的とする。複数のパラメタ領域を調査し、マッハ数、イオン・電子質量比による衝撃波波乗り加速の効

率を理論的に導く。

### 3. 研究の方法

衝撃波における電子加速を明らかにするため、2次元 Particle-in-Cell (PIC) シミュレーションを行った。また、大きなイオン・電子質量比、高マッハ数領域にせまるためには、必然と大規模な数値計算の実行が必要となる。そこで、2次元PICコードの超並列化を行い、近年の超並列計算機において効率的に実行できる数値コードの開発を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) PICコードの並列化

最新の超並列計算機に対応するため、多次元PICコードの最適化・並列化を行った。ノード内を OpenMP によるスレッド並列、ノード間を MPI によるプロセス並列する、ハイブリッド並列化に成功し、 $10^5$  を超える並列数でも、実行効率 12% 超の高効率な PIC コードの開発に成功した。

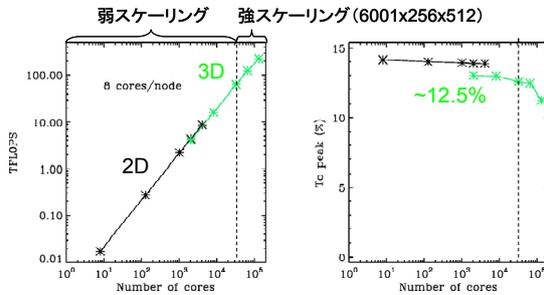


図1：「京」コンピュータ上で行ったパフォーマンステスト結果。横軸は並列数を表し、縦軸は（左図）TFLOPS、（右図）実行効率を表す。黒線は2次元コードの結果、緑線は3次元コードの結果。

#### (2) 高マッハ数衝撃波の2次元PICシミュレーション

電子の衝撃波波乗り加速は反射イオンと上流電子との相互作用によって励起される Buneman 不安定によってもたらされる。その不安定条件は衝撃波の系では、

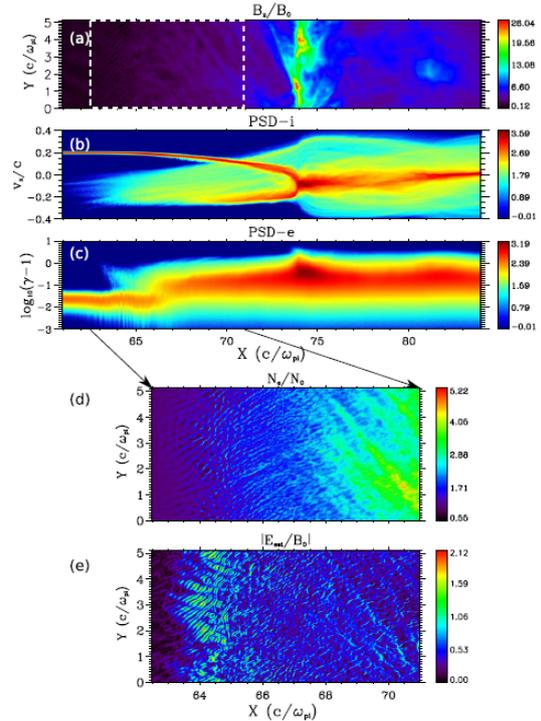
$$M_A \geq \frac{1 + \alpha}{2} \sqrt{\beta_e} \left( \frac{M}{m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

のように、アルヴェンマッハ数  $M_A$  に制限を与え（ここで、 $\alpha \sim 0.2$ 、 $\beta_e$  は電子ベータ値）、イオン・電子質量比 ( $M/m$ ) の関数となる。また、相対論的電子を補足し続けるための条件としては、

$$M_A \geq (1 + \alpha) \left( \frac{M}{m} \right)^{\frac{2}{3}}$$

の条件が得られる。同様に  $M/m$  の関数となる。従って、数値計算上制約せざるを得ない質量

図2：高マッハ数衝撃波の2次元PIC計算結果。上から順に磁場  $z$  成分、イオン、電子の位相空間密度、衝撃波先端での電子密度、静



電場強度を表す。

比は、人為的に上記条件を緩めていることになり、これらの条件に注意しながら実パラメタにおける衝撃波波乗り加速の効率を議論する必要がある。

図2は、上記条件を同時に満たす、2次元高アルヴェンマッハ数 ( $M_A \sim 30$ )・高質量比 ( $M/m=100$ ) の計算結果である。理論から予測されるように、Buneman 不安定が励起され、高強度の静電場構造が存在する。その静電ポテンシャルに補足された電子は、背景にある対流電場によって  $y$  方向に加速され続ける。これが電子の衝撃波波乗り加速であり、上記条件を満たす状況においては、高いマッハ数・質量比でも効率的に実現されるうことが示された (図3)。

高マッハ数衝撃波の波面では、オーバーシュートと呼ばれる、下流域より強い振幅をもつ領域が存在する。この高強度磁場領域では前段階加速された相対論的電子が断熱的加速を受けることが明らかになった (図4)。以上の2段階加速により、熱的電子は相対論的エネルギー (ローレンツ因子  $\gamma \sim 9$ ) まで加速されることが明らかになった。

図5は、アルヴェンマッハ数、質量比を変えた場合の電子のエネルギースペクトルの比較図である。その結果、上記補足条件を満たした場合（黒、緑）は、非熱的な成分を構成する相対論的エネルギーの電子が多く作られるのに対し、上記補足条件を満たさない（不安定条件は満たす）場合（マジエンタ）は、Buneman 不安定によって励起される電場強度が弱く、高エネルギー電子の生成が抑えられる結果となっている。

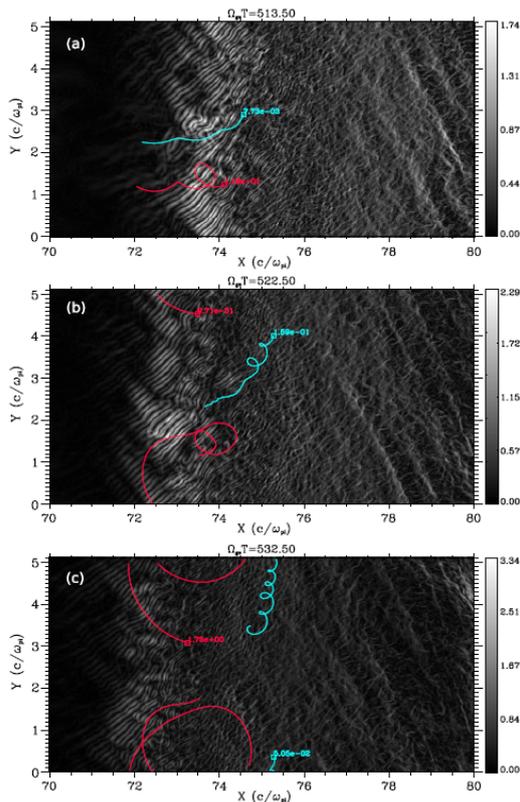


図3：背景色は上流磁場で規格化された静電場強度を表す。赤線は被加速電子、青線は熱的電子の軌道を表す。

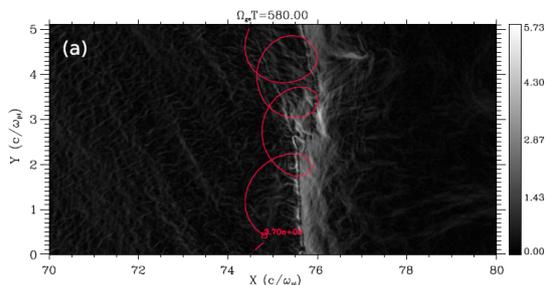
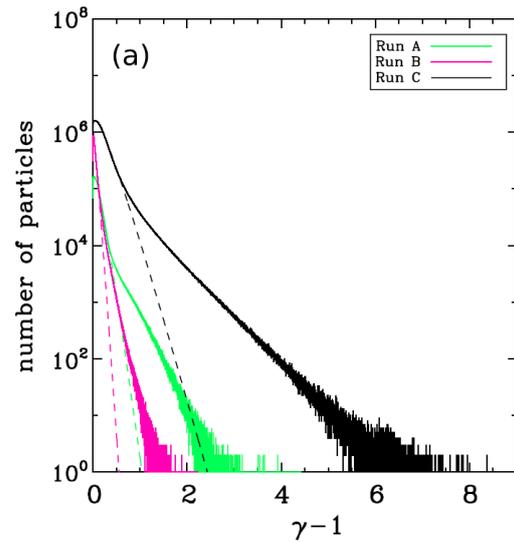


図4：衝撃波面における相対論的電子の断熱加速。

以上の様に、理論的考察から求めた電子の加速条件の検証を行った。上記条件式を現実のイオン電子質量比に当てはめると、 $M/m=1836$ では、 $M_A > 150$ の高マッハ数領域において電子

が効率的に前段階加速を受けることができ、それは、比較的若い超新星残骸衝撃波におい



て実現されうることを示唆している。

図5：電子のエネルギースペクトル。横軸はローレンツ因子から1を引いたもの（運動エネルギー）。縦軸は粒子数。各色は、緑： $M/m=25$ ,  $M_A \sim 15$ 、赤： $M/m=100$ ,  $M_A \sim 15$ 、黒： $M/m=100$ ,  $M_A \sim 30$ の結果を表す。いずれも、電子 $\beta$ は0.5。

### 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1件）

- ① Y. Matsumoto, T. Amano, and M. Hoshino, "Electron Accelerations at High Mach Number Shocks: Two-Dimensional Particle-In-Cell Simulations in Various Parameter Regimes", *Astrophys. J.*, 755, 109-119, 2012, doi:10.1088/0004-637X/755/2/109

〔学会発表〕（計9件）

- ① 松本洋介、「超高マッハ数衝撃波におけるプラズマ不安定性と電子加速」、日本物理学会、2013年3月29日、広島大学
- ② Y. Matsumoto, "Electron accelerations at high Mach number shocks: Two-dimensional Particle-in-Cell simulations in various parameter regimes", AGU Fall meeting, Dec. 5 2012, USA
- ③ Y. Matsumoto, "Electron accelerations at high Mach number shocks: Two-dimensional Particle-in-Cell simulations on massively parallel supercomputer systems",

EANAM 2012, Nov. 2 2012, Kyoto Univ.

④Y. Matsumoto, "Electron accelerations at high Mach number shocks: Two-dimensional Particle-in-Cell simulations on massively parallel supercomputer systems", CCP2012, Oct. 18 2012, Kobe

⑤Y. Matsumoto, "Electron accelerations at high Mach number shocks: Two-dimensional Particle-in-Cell simulations on massively parallel supercomputer systems", JSST2012, Sep 27 2012, Kobe

⑥松本洋介、「2次元超高マッハ数衝撃波におけるプラズマ不安定性」、日本天文学会2012年秋季年会、2012年9月22日、大分大学

⑦松本洋介、「超並列電磁プラズマ粒子コードによる高マッハ数衝撃波における電子加速」、地球惑星関連学会2012年合同大会、2012年5月22日、幕張メッセ

⑧松本洋介、「超並列電磁プラズマ粒子コードによる高マッハ数無衝突衝撃波における電子加速」、日本天文学会2012年春季大会、2012年3月22日、龍谷大学

⑨松本洋介、「超並列版電磁プラズマ粒子コードによる高マッハ数無衝突衝撃波における電子加速」、Plasma Conference 2011, 2011年11月22日、石川県立音楽堂

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松本 洋介 (MATSUMOTO YOSUKE)  
千葉大学・大学院理学研究科・特任助教  
研究者番号：20397475

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：