

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24年5月14日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740164

研究課題名（和文） 大規模粒子シミュレーションによる無衝突衝撃波の物理と粒子加速および磁場生成の研究

研究課題名（英文） Study of collisionless shocks, particle acceleration and magnetic field generation by using large-scale plasma particle simulation

研究代表者

加藤 恒彦 (KATO TSUNEHIKO)

広島大学・大学院理学研究科・特任助教

研究者番号：90413955

研究成果の概要（和文）：宇宙の超新星残骸などで発生する、弱い背景磁場を持つ電子・陽子プラズマ中の高マッハ数の無衝突衝撃波について、大規模なプラズマ粒子シミュレーションを用いて研究した。その結果、弱い背景磁場がある場合でも衝撃波の遷移層でワイベル不安定性が成長し、遷移層とその下流領域で乱れた磁場を作ることや、背景磁場の向きが衝撃波法線に近い衝撃波では、フェルミ加速と同様の粒子加速が起こり、冪分布の高エネルギー粒子が効率的に生成されることなどがわかった。

研究成果の概要（英文）：By using large-scale plasma particle simulations, we study high-Mach number collisionless shocks in weakly magnetized electron-proton plasmas, which are frequently driven in a variety of astrophysical environment, such as supernova remnants. It is shown that the Weibel instability is driven in the shock transition region even in perpendicular shocks, and then, turbulent magnetic fields are generated by this instability in the transition region and the downstream region. It is also found that in quasi-parallel shocks a particle acceleration mechanism similar to the Fermi acceleration works and efficiently generates high-energy particles with a power-law energy spectrum.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：プラズマ、衝撃波、粒子加速、不安定性、磁場生成、宇宙物理学、レーザー実験

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間の大部分は無衝突プラズマと呼ばれる荷電粒子間のクーロン衝突がほとんど起きないプラズマで満たされている。宇宙空間で超新星爆発などの爆発的な現象が起きると、このような無衝突プラズマ中に衝撃波が発生する。これは無衝突衝撃波と呼ばれ、

その名の通り、衝撃波の散逸過程が粒子間のクーロン衝突ではなく電磁場の変動を伴った運動論的な集団現象により担われるものである。

超新星残骸におけるこのような無衝突衝撃波は、エネルギー供給率の議論などから、地球に降り注ぐ宇宙線の起源の有力な候補

の1つと古くから考えられてきた。近年の X 線による観測によって超新星残骸の衝撃波で電子からのシンクロトロン X 線が観測され、電子が非常に高いエネルギー（約 10^{14} eV）にまで加速されていることが明らかになった。このことは同時に陽子宇宙線も超新星残骸の衝撃波で加速されていることの間接的な証拠であると考えられている。また同様な X 線観測により、このような衝撃波の周辺で磁場の強さが背景磁場の 100 倍近くも増幅されていることも示唆されている。このように、無衝突衝撃波は、その形成機構のみならず、粒子加速や磁場生成という観点からも宇宙物理学に重要な現象である。

無衝突衝撃波の形成過程は、無衝突プラズマ中の非常に複雑な運動論的非線形現象であり、理論的には、主に背景磁場がある場合について、電磁粒子シミュレーションやハイブリッド・シミュレーションと呼ばれるシミュレーションにより研究されてきた。しかし、超新星残骸の衝撃波のようにマッハ数の非常に大きな衝撃波や背景磁場が非常に弱い場合に関しては、研究はまだ発展途上であり、その物理過程は十分には理解されていない。一方、長い間、背景磁場が無い場合には無衝突衝撃波は形成されないと考えられてきたが、近年、背景磁場を持たない無衝突プラズマ中にも無衝突衝撃波が形成されることが研究代表者らによる一連の電磁粒子シミュレーションにより示された。この過程では、ワイベル不安定性というプラズマ中の不安定性が重要となり、不安定性によって生成された強い磁場が衝撃波の散逸機構を担うことが明らかになった。これは「不安定性駆動型」という新しい種類の無衝突衝撃波である。ワイベル不安定性の成長過程は、1 次元の衝撃波のシミュレーションでは取り扱えないため、多次元のシミュレーションという点が本質的であった。このような種類の衝撃波は、背景磁場が無いか非常に弱い場合には、電子・陽子プラズマにおいても形成される可能性がある。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、宇宙の超新星残骸に見られるような高マッハ数（典型的には 100 程度）の無衝突衝撃波の形成過程および、そこで同時に起きる可能性がある粒子加速過程や磁場生成過程を明らかにすることである。背景磁場の存在は、これらの過程に大きく影響を及ぼす可能性があるため、本研究課題では、主として弱い背景磁場がある場合の無衝突衝撃波について調べた。

3. 研究の方法

無衝突衝撃波は、粒子と電磁場の運動論的な相互作用により形成されるものであり、このような運動論的現象をきちんと取り扱うことができるプラズマ電磁粒子シミュレーション (PIC シミュレーションとも呼ばれる) を主軸として研究を行った。また、より長いタイムスケールでの粒子加速過程や磁場増幅過程を見るために、電子を流体的に扱うハイブリッド・シミュレーションを用いた研究も行った。

4. 研究成果

平成 22 年度には、まず大阪大学の SX9 用開発してあった電磁粒子シミュレーションコードにさらに並列化やベクトル化の点で改良を加え、それを用いて種々の計算を行った。

平成 22 年度の主な研究では、弱い垂直背景磁場がある場合（衝撃波法線に対して背景磁場の向きが垂直である場合）の電子・陽子プラズマ中の無衝突衝撃波の形成過程を調べた。衝撃波のマッハ数は約 130 に相当する。その結果、超新星残骸での衝撃波に相当する非常に弱い背景磁場であっても、衝撃波の形成には本質的な役割をすることや、衝撃波の遷移層でワイベル型の不安定性が成長して電流フィラメントを作り (図 1)、遷移層および下流領域で乱れた磁場を作ること (図 2) などが明らかになった。また、シミュレーション結果に基づき、不安定性の局所的な線形解析を行った結果、衝撃波遷移層で Buneman 不安定性とイオン音波不安定性の 2 種類の静電的不安定性が成長し、電子と陽子が加熱されることがわかった。衝撃波の下流では電子と陽子の温度は等しくならず、この計算では陽子温度が電子温度の約 4 倍という結果になった。ただし、温度比の値は計算で使用する質量比にも依存すると考えられるため（この計算では $m_p/m_e=30$ ）、その定量的な議論のためには、今後、より現実に近い質量比を用いて計算を行うことが必要である。一方、高エネルギーへの粒子加速に関しては、陽子のわずかな加速は見られたものの、冪型のエネルギースペクトルを持った加速粒子は確認されなかった。従って、弱い背景磁場を持つ垂直衝撃波では、このような冪型のエネルギースペクトルを持つ加速粒子を作るのは難しいと考えられる。この研究の成果は、Astrophysical Journal 誌に掲載された (下記リスト 3)。また、複数の学会や研究会で発表を行った。

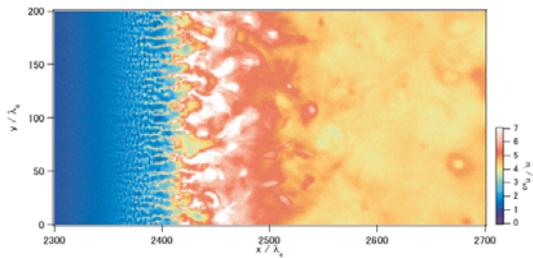


図1：弱い背景磁場がある場合の無衝突衝撃波の2次元シミュレーション。色は陽子の数密度を表す。衝撃波の上流側（左側）にフィラメント状の構造が見える。

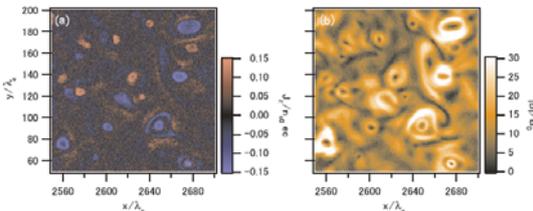


図2：衝撃波下流に残る電流フィラメント（左）およびそれらが生成する乱れた磁場（右）。

平成23年度においては、まず、前年度までに開発した電磁粒子シミュレーションコードを用いて、磁場の向きが衝撃波法線に対して完全には垂直でない場合について計算を行った。その結果、マッハ数が20程度の無衝突衝撃波において、磁場と衝撃波法線がなす角が10度程度以下の場合には、その構造は平行衝撃波の場合に近くなり下流領域でフィラメント状電流が作る磁場が卓越するのに対して、角度が30度程度以上になると垂直衝撃波に近い構造になり、下流では圧縮された背景磁場が優勢になること等を示した。これらのシミュレーションの計算時間の間には、顕著な電子や陽子の加速は見られなかった。

より長いタイムスケールで、陽子の加速過程や磁場の生成過程を見るために、次にハイブリッド・シミュレーションコードを新たに開発して計算を行った。その結果、衝撃波法線と磁場のなす角度が30度程度の場合には、Sugiyama (2011)で報告されたような、フェルミ加速と同様の加速が衝撃波近傍で起き、加速された陽子のエネルギースペクトルがほぼ冪型になることを確認し、加速の最大エネルギー (E_c) 付近ではエネルギースペクトルのカットオフの形が $\exp[-(E/E_c)^2]$ で良くフィットできることなどを示した (図3)。また、加速粒子が上流のプラズマ中に背景磁場と同程度の非常に強い磁場の乱れを励起することや、このような磁場の乱れによる粒子の散乱は非常に効果的に起こり、加速の効率も理論上の最良値に近くなることを示した。個々の粒子の加速の過程についても調べ、衝撃波のマッハ数が15程度と比較的大きい場合には、

上流の乱れの磁場の振幅も大きくなり、その磁場に反射される2次加速的な加速が起きていることもわかった。さらに磁場の角度を変えた場合やマッハ数を変えた場合などについても計算を行い、粒子加速の効率や、加速粒子のエネルギースペクトルの形などについて比較をした。以上の研究成果については、天文学会や種々の研究会等で発表を行い、現在論文を執筆中である。

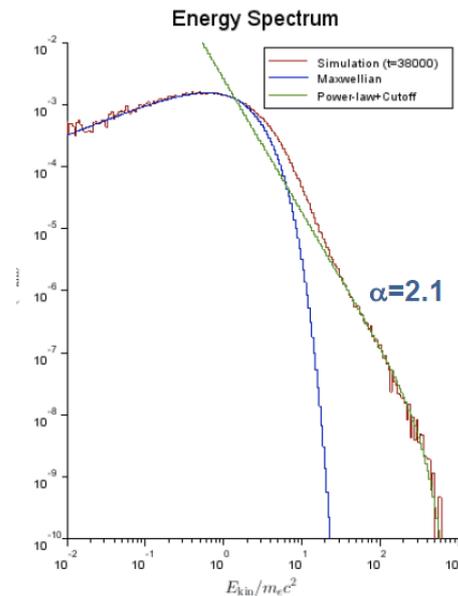


図3：衝撃波面法線と背景磁場のなす角度が30度の場合のハイブリッド・シミュレーションから得られた陽子のエネルギー分布（赤のヒストグラム）。フェルミ加速で予想される指数が約2の冪型分布（緑）で良くフィットできる。また、最大エネルギー E_c 付近の分布の形は $\exp[-(E/E_c)^2]$ で良く表される。

本研究課題で行ったマッハ数 130 の無衝突衝撃波の計算は、電磁粒子シミュレーションの計算としては、現時点で最もマッハ数の大きな計算であり、そのような衝撃波の形成過程、加熱過程、磁場生成過程などが明らかになった意義は大きいと考える。ハイブリッド・シミュレーションにより陽子の加速が見えてきたことも重要である。今後は、電子と陽子の質量比をより現実に近い計算や、電磁粒子シミュレーションを用いたより長時間の計算を行い、陽子だけでなく電子の加速過程についても詳細に調べていくことが重要な課題であると考えられる。

なお、本研究課題で研究対象としている無衝突衝撃波は、近年技術発展が著しいレーザー実験装置を用いて実験的に調べることも可能になりつつあり、その可能性等についても研究・考察を行った。これについても、学会等で発表を行い、関連論文も発表した（共著者）。

2年間の研究において、シミュレーションコードの開発や、データの保存、可視化、お

よび論文の作成には研究費で購入したハードウェアやソフトウェアを使用し、成果発表のため旅費を使用した。

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3件)

1. X Liu, Y T Li, Y Zhang, J Y Zhong, W D Zheng, Q L Dong, M Chen, G Zhao, Y Sakawa, T Morita, Y Kuramitsu, T N Kato, L M Chen, X Lu, J L Ma, W M Wang, Z M Sheng, H Takabe, Y-J Rhee, Y K Ding, S E Jiang, S Y Liu, J Q Zhu and J Zhang, "Collisionless shockwaves formed by counter-streaming laser-produced plasmas", New Journal of Physics, 13, 査読有, 2011, 093001 (8pp), doi:10.1088/1367-2630/13/9/093001
2. T. Morita, Y. Sakawa, Y. Kuramitsu, S. Dono, H. Aoki, H. Tanji, T. N. Kato, Y. T. Li, Y. Zhang, X. Liu, J. Y. Zhong, H. Takabe, and J. Zhang "Collisionless shock generation in high-speed counter-streaming plasma flows by a high-power laser", Physics of Plasmas, 17, 査読有, 2010, 122702 (15pp), doi:10.1063/1.3524269
3. Tsunehiko N. Kato, Hideaki Takabe, "Nonrelativistic collisionless shocks in weakly magnetized electron-ion plasmas: two-dimensional particle-in-cell simulation of perpendicular shock", The Astrophysical Journal, 721, 査読有, 2010, pp828-842, doi:10.1088/0004-637X/721/1/828

[学会発表] (計12件)

1. 加藤恒彦、「超高強度レーザーによる真空崩壊と電子対プラズマ生成」、日本天文学会 2012 年春期年会 (基調講演)、2012 年 3 月 20 日、龍谷大学深草キャンパス (京都府京都市)
2. 加藤恒彦、「宇宙の無衝突衝撃波と PIC シミュレーション」、STE シミュレーション研究会 (招待講演)、2012 年 3 月 2 日、広島大学東千田キャンパス (広島県広島市)
3. 加藤恒彦、「無衝突衝撃波でのイオン加速」、高エネルギー宇宙物理学研究会、2011 年 12 月 17 日、大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)
4. 加藤恒彦、「斜め衝撃波でのイオン加速」、第 24 回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学の革新」、2011 年 11 月 5 日・7 日、国立天文台三鷹キャンパス (東京都三鷹市)
5. 加藤恒彦、「背景磁場に対して斜めに伝搬する

高マッハ数の無衝突衝撃波」、日本天文学会 2011 年秋期年会、2011 年 9 月 21 日、鹿児島大学郡元キャンパス (鹿児島県鹿児島市)

6. 加藤恒彦、「宇宙の衝撃波と粒子加速」、瀬戸内サマーインスティテュート (招待講演)、2011 年 9 月 1 日、岡山県青少年教育センター閑谷学校 (岡山県備前市)
7. 加藤恒彦、「高マッハ数の無衝突衝撃波の PIC シミュレーション: 衝撃波遷移層で起きる不安定性について」、「若手・中堅研究者が目撃する次世代の宇宙物理」研究会 (招待講演)、2011 年 2 月 25 日、チサンリゾート石垣 (沖縄県石垣市)
8. 加藤恒彦、「高マッハ数の無衝突衝撃波の PIC シミュレーション: 衝撃波遷移層で起きる不安定性について」、山形大学理学部物理学宇宙物理学研究グループ談話会 (招待講演)、2011 年 2 月 4 日、山形大学理学部 (山形県山形市)
9. 加藤恒彦、「無衝突衝撃波のシミュレーション」、次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2010 および第 1 回戦略プログラム 5 分野合同ワークショップ、2011 年 1 月 17 日、ニチイ学館 神戸ポートアイランドセンター (兵庫県神戸市)
10. 加藤恒彦、「高マッハ数の無衝突衝撃波での加熱過程について: 衝撃波遷移層で起きる不安定性」、第 23 回理論懇シンポジウム「林忠四郎先生と天文学・宇宙物理学」、2010 年 12 月 20 日、京都大学基礎物理学研究所 湯川記念館・パナソニックホール (京都府京都市)
11. 加藤恒彦、「高マッハ数の無衝突衝撃波の PIC シミュレーション: 衝撃波遷移層で起きる不安定性について」、高エネルギー宇宙物理学研究会、2010 年 10 月 14 日、高エネルギー加速器研究機構 (茨城県つくば市)
12. 加藤恒彦、「弱い背景磁場中の無衝突衝撃波のダイナミクス」、日本天文学会 2010 年秋季年会、2010 年 9 月 23 日、金沢大学 角間キャンパス (石川県金沢市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 恒彦 (KATO TSUNEHIKO)

広島大学・大学院理学研究科・特任助教
研究者番号: 90413955

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: