

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02877

研究課題名(和文) 相対論的衝撃波における電子加速機構についての磁化強度 に対する包括的研究

研究課題名(英文) Comprehensive study of the electron acceleration mechanism in relativistic shocks for different magnetization strength

研究代表者

松本 洋介 (Matsumoto, Yosuke)

千葉大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：20397475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギー宇宙線の起源として、宇宙の爆発的現象に伴う衝撃波が宇宙線加速機構として考えられている。本研究では、特に相対論的(ほぼ光速で運動する)衝撃波におけるダイナミクスをスーパーコンピューターを使ったシミュレーションで明らかにした。具体的には、衝撃波上流の磁場の大きさに関わらず、電子が高強度の電磁波を放射すること、放射された電磁波と上流プラズマとの相互作用で、イオン・電子ともに加速するといった新たな描像を得ることができた。上流磁場強度に対するサーベイを行った結果、最も効率的な電磁波放射を突き止めることができ、強い磁場持つ中性子星フレアに応用可能であることが示唆できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超高エネルギー宇宙線の起源は、長年の宇宙物理学の課題の一つである。これまで考えられてきた衝撃波による加速は、相対論的状況下では有効に働かず、新たな機構が求められてきた。本研究では、相対論的衝撃波からの電磁波放射が普遍的に起こること、また、放射された電磁波とプラズマの相互作用の結果、イオン・電子ともに加速されることを明らかにした。これは、超高エネルギー宇宙線の起源に迫るだけでなく、謎の放射機構として知られる高速電波バーストの起源としても説明可能であることが示された。本研究によって宇宙の謎の2つの解明に迫ることができた。

研究成果の概要(英文)：High-energy cosmic rays are thought to be accelerated by shock waves associated with explosive events in the universe. In this study, we used a supercomputer to simulate the dynamics of relativistic (near light speed) shocks. Specifically, we found that electrons radiate intense electromagnetic waves regardless of the strength of the upstream magnetic field. The emitted electromagnetic waves interact with the upstream plasma and accelerate both ions and electrons. We conducted a survey of the upstream magnetic field strength and identified the most efficient electromagnetic radiation mechanism. This suggests that it can be applied to neutron star flares with strong magnetic fields.

研究分野：天体プラズマ物理学

キーワード：高エネルギー宇宙線 衝撃波 プラズマ粒子加速 PICシミュレーション ハイパフォーマンスコンピューティング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

宇宙線スペクトルの「knee」を超えて 10^{20} eV に達する超高エネルギー宇宙線 (UHECR) の起源は銀河系外の遠方にあると考えられ、超新星残骸のような比較的エネルギーの低い宇宙線起源に比べて、UHECR の起源となる天体を特定することが観測的に重要な課題となっている。一方、理論モデルとしては、AGN ジェットやガンマ線バースト (GRB) などほぼ光速で噴出するジェットに伴って形成される相対論的衝撃波が効率的な加速エンジンとして挙げられている。

衝撃波近傍における荷電粒子の加速機構として、衝撃波統計加速 (DSA、1 次フェルミ加速) が標準理論として知られる (Blandford & Ostriker 1978; Bell 1978)。DSA の相対論的衝撃波への適用として、理論的な研究 (e.g., Keshet & Waxman, 2005) やモンテカルロ法による数値計算 (e.g., Ellison et al., 2013) が行われ、粒子のエネルギースペクトルの議論がされてきたが、磁場乱流強度・背景磁場配位に大きな仮定・制約があり、磁場乱流強度などを第一原理的に理解することが求められている (Warren & Ellison, 2015; Warren, private communication)。

無衝突衝撃波の第一原理計算として、particle-in-cell (PIC) シミュレーションが挙げられる。相対論的衝撃波の研究は 1990 年代の 1 次元 PIC 計算から始まり (Hoshino & Arons, ApJ, 1991; Gallant et al., 1992) 電磁波による陽電子・電子の加熱・加速が正確に議論できるようになった。とりわけ、衝撃波面で励起され上流へと伝搬する大振幅電磁波による航跡場加速 (Hoshino, ApJ, 2008) はレーザープラズマ加速の知見を応用した新しい衝撃波加速機構であり、UHECR の加速に重要なプロセスとして広く着目されている (Chen, 2002; Kuramitsu et al., 2008; Ebisuzaki & Tajima, 2014)。2 次元 PIC 計算による研究では、ワイベル不安定が相対論的衝撃波における磁場生成において重要な役割を果たすことが明らかになった (Kato, ApJ, 2007)。さらに、衝撃波面近傍の磁気乱流によってフェルミ加速が (陽) 電子に対して働き、指数 -2.4 のべき乗エネルギー分布が形成されることが報告された (Spitkovsky, 2008)。これは、GRB 残光の観測、理論やモンテカルロ計算で予測されていた指数と近い値であり、第一原理計算結果として報告された本結果は理論モデルに対して大きな影響を与えた。その後、様々なパラメータに対する加速効率についての研究に発展したが、主に 1 グループ (Spitkovsky, 2008; Sironi et al., 2009, 2011, 2013) から報告されているのみというのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究ではイオン・電子系の相対論的衝撃波における電子加速に着目する (イオン加速は本計画終了後の発展的課題とする)。上流の磁化強度 (磁気エネルギー / 電子の運動エネルギー) のパラメータ範囲それぞれによって支配される加速機構や磁場構造を明らかにすることを目的とする。具体的には下記のような課題を設定する。

磁場が非常に弱い条件下 ($<10^{-3}$) では、ワイベル不安定を介した磁気乱流構造が衝撃波面近傍で卓越する。我々はこれまで非相対論的衝撃波でのイオンワイベル不安定による乱流リコネクションとそれに伴う電子の統計加速を提唱した (Matsumoto et al., Science, 2015)。これを踏まえ、相対論的衝撃波中の乱流リコネクションによる電子の統計加速を明らかにすることを目的とする。相対論的リコネクション電場による効率的な加速はこれまで提唱されているが (Zenitani & Hoshino, 2001; Sironi & Spitkovsky, 2014)、衝撃波構造に埋め込まれた中での相対論的乱流リコネクション加速については未だ報告例がなく、世界に先駆けて明らかにすることを目指す。

磁場が比較的強い条件下 ($10^{-1} < <1$) では大振幅電磁場による航跡場加速が 1 次元 PIC 計算で報告されている (Hoshino, ApJ, 2008)。そこで、電磁場へのエネルギー変換効率が最も高い $\sim 10^{-1}$ のパラメータ領域 (cf. Gallant et al., 1992) に着目した多次元 PIC 計算を実施する。電磁場励起源となる衝撃波面でのシンクロトロンメーザー (S-M) 不安定が多次元構造中でのどのように不安定化するか、また結果として航跡場加速が多次的にどのように進展するかについて明らかにすることを目的とする。Kuramitsu et al. (2008) では多次元航跡場構造中の効率的な加速が報告されており、相対論的衝撃波においても実現されるかについて明らかにしたい。

3. 研究の方法

最新のスーパーコンピュータを駆使した多次元 PIC 計算を実施する。これまで開発した数値チェレンコフ不安定の抑制方法と他手法との比較検証を実施し、手法の信頼性をより強固なものにする。衝撃波速度のバルクローレンツ因子 が比較的大きなパラメータ ($\gamma = 10 \sim 100$) の垂直衝撃波 (上流磁場と衝撃波面法線ベクトルが直交) を考える。構成するプラズマは陽電子・電子系、イオン・電子系とする。また、上流の磁化強度 に着目し、それぞれのパラメータ領域で支配的な加速メカニズムを明らかにする。上流の磁化強度 が非常に小さいパラメータ領域での乱流リコネクション加速、比較的磁場が強い条件での航跡場加速について、それぞれ 2 次元 PIC 計算の実施を開始する。以降は、2 次元計算を中心に複数の パラメータ領域の計算を行うことで結果の整理を行う。その結果を踏まえ、それぞれのパラメータ領域で大規模 3 次元 PIC 計算の実施を行い、相対論的衝撃波における電子加速理論の構築を に対して包括的に行う。

4. 研究成果

(1) 多次元相対論的衝撃波構造中の電磁波放射の普遍性の解明

2次元PICシミュレーションを実施し、陽電子・電子プラズマ中の相対論的衝撃波の2次元構造を明らかにした。様々な上流磁化強度についてサーベイし、弱磁場条件から高強度磁場条件にいたるまでの電磁波放射効率を世界で初めて明らかにした。幅広い磁化条件で高強度の電磁波放射が起きることが明らかになり、電磁波放射は相対論的衝撃波に付随する普遍的な性質であることを解明した (Iwamoto et al., ApJ, 2017; 2018)。

(2) イオンワイベル不安定の3次元飽和過程

弱磁場条件下で重要となる、ワイベル不安定による磁場生成と飽和過程を調べた。イオン・電子系での大規模3次元PICシミュレーションを行い、イオンワイベル不安定による磁場生成とその飽和過程について世界で初めて明らかにした。3次元計算では強い磁場を長時間維持することが可能であることが明らかになり、これまでの研究で示された磁場の急速な散逸は2次元による次元制約であることを示した (Takamoto et al., ApJL, 2018)。その後、複数のパラメタの下での磁場飽和強度についてまとめた。電流方向に卓越するキンク不安定との競合過程を議論し、相対論的な状況においてはキンク不安定による散逸に打ち勝って強い磁場を維持することが可能であることを議論した (Takamoto et al., ApJ, 2019)。

(3) イオン・電子系での相対論的衝撃波と高強度電磁波放射

イオン・電子系における相対論的衝撃波の2次元PICシミュレーションによる研究を行った。これまでと同様に、複数の上流磁化強度における電磁波放射強度の違いについて調べた。その結果、陽電子・電子系と同じく普遍的に電磁波放射が起きることを確認できた。さらに、予想外な結果も得られた。イオン・電子系では高強度の電磁波放射が伝搬するに連れ、航跡場 (wakefield) が励起される。この強い静電場によって電子がエネルギーを得ることで、陽電子・電子系よりもイオン電子質量比倍強い電磁波放射が励起されることが明らかになった。また、最も高強度に励起される磁化強度の条件も質量比によって違うことが明らかになった。本成果は多次元衝撃波において高強度の電磁波放射を示した世界初の例である (Iwamoto et al., ApJL, 2019)。

(4) イオン・電子系での相対論的衝撃波における粒子加速

2次元計算では、放射される電磁波が上流では非一様に発展し (filamentation instability) 電磁場強度の濃淡が顕著になる。上流ローレンツ因子が大きい条件では、その非一様性から磁場強度が0に近い領域が形成され、上流粒子の一部がその場で大きなエネルギーを得ることが明らかになった。そのプロセスは、古典的なピックアップイオン加速と同じで、その相対論版である。ピックアップによる最大エネルギー利得は上流ローレンツ因子の3乗に比例することから、ガンマ線バーストなど、外部シェルにおける効率的な粒子加速機構となりうることを、理論・シミュレーションの観点から示すことができた (Iwamoto et al., ApJ, 2022)。

(5) 相対論的衝撃波の3次元PICシミュレーションと高速電波バーストへの応用

さらに、これまでのイオン・電子系の2次元計算から発展させ、スーパーコンピューター「富岳」を用いた大規模3次元計算を実施した。その結果、これまで同様3次元においても高強度の電磁波放射が発生することを明らかにした。3次元計算を行うことで初めて、X₀モード放射を正確に記述することが可能になり、得られた電磁場データよりストークスパラメタを計算し、放射される電磁波の偏光特性を定量的に明らかにすることに成功した。その結果、強い直線偏光の放射が特定の波長 (周波数) で得られること、その強度が非常に大きいことから、電波領域で観測される高速電波バースト (FRB) の起源として説明可能であることを世界で初めて定量的に示すことができた。本成果を論文としてまとめて投稿中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iwamoto Masanori, Amano Takanobu, Matsumoto Yosuke, Matsukiyo Shuichi, Hoshino Masahiro	4. 巻 924
2. 論文標題 Particle Acceleration by Pickup Process Upstream of Relativistic Shocks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 108 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac38aa	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Iwamoto Masanori, Amano Takanobu, Hoshino Masahiro, Matsumoto Yosuke, Niemiec Jacek, Ligorini Arianna, Kobzar Oleh, Pohl Martin	4. 巻 883
2. 論文標題 Precursor Wave Amplification by Ion?Electron Coupling through Wakefield in Relativistic Shocks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L35 ~ L35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab4265	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takamoto Makoto, Matsumoto Yosuke, Kato Tsunehiko N.	4. 巻 877
2. 論文標題 Evolution of Three-dimensional Relativistic Ion Weibel Instability: Competition with Kink Instability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 137 ~ 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab1911	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Iwamoto Masanori, Amano Takanobu, Hoshino Masahiro, Matsumoto Yosuke	4. 巻 858
2. 論文標題 Precursor Wave Emission Enhanced by Weibel Instability in Relativistic Shocks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 93 ~ 93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaba7a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takamoto Makoto, Matsumoto Yosuke, Kato Tsunehiko N.	4. 巻 860
2. 論文標題 Magnetic Field Saturation of the Ion Weibel Instability in Interpenetrating Relativistic Plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L1 ~ L1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aac6d6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Amano Takanobu, Iwamoto Masanori, Matsumoto Yosuke, Hoshino Masahiro	4. 巻 119
2. 論文標題 The Efficiency of Coherent Radiation from Relativistic Shocks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 In: Yamanouchi K., Tunik S., Makarov V. (eds) Progress in Photon Science. Springer Series in Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 371 ~ 383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-05974-3_19	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yosuke Matsumoto, Takanobu Amano, Tsunehiko N. Kato, and Masahiro Hoshino	4. 巻 119
2. 論文標題 Electron surfing and drift accelerations in a Weibel-dominated high-Mach-number shock	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 105101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.119.105101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwamoto Masanori, Amano Takanobu, Hoshino Masahiro, Matsumoto Yosuke	4. 巻 840
2. 論文標題 Persistence of Precursor Waves in Two-dimensional Relativistic Shocks	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophys. J.	6. 最初と最後の頁 52 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa6d6f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwamoto Masanori, Amano Takanobu, Matsumoto Yosuke, Matsukiyo Shuichi, Hoshino Masahiro	4. 巻 924
2. 論文標題 Particle Acceleration by Pickup Process Upstream of Relativistic Shocks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 108 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac38aa	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計11件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Yosuke Matsumoto
2. 発表標題 Stochastic electron acceleration in weakly magnetized high-M shocks: Weibel B-field generation & turbulent reconnection
3. 学会等名 10th Korean Astrophysics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Magnetic field saturation of the ion Weibel instability in interpenetrating relativistic plasmas
2. 発表標題 Yosuke Matsumoto, Makoto Takamoto, Tsunehiko N. Kato
3. 学会等名 AAPPS-DPP 2st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本洋介
2. 発表標題 相対論的衝撃波のParticle-In-Cellシミュレーション
3. 学会等名 宇宙線研小研究会「高エネルギー天体現象の多様性」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本洋介、高本亮、加藤恒彦
2. 発表標題 イオンワイベル不安定の飽和過程と磁場生成
3. 学会等名 日本地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Matsumoto, T. Amano, T. N. Kato, and M. Hoshino
2. 発表標題 3D PIC simulations of high-Mach-number shocks and associated electron accelerations
3. 学会等名 12th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics (HEDLA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本洋介、細谷周平
2. 発表標題 Cole-Karkkainen電磁場数値解法を用いた数値チェレンコフ放射の抑制特性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合連合大会2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本洋介、天野孝伸、加藤恒彦、星野真弘
2. 発表標題 高マッハ数衝撃波の3次元PICシミュレーション：電子加速効率のパラメタ依存性
3. 学会等名 日本地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yosuke Matsumoto
2. 発表標題 Electron accelerations at high-Mach-number collision-less shocks
3. 学会等名 AAPPS-DPP 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松本洋介、天野孝伸、加藤恒彦、星野真弘
2. 発表標題 無衝突衝撃波における磁気エネルギー散逸と電子加速
3. 学会等名 衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松本洋介、細谷周平
2. 発表標題 Cole-Karkkainen電磁場数値解法を用いた数値チェレンコフ放射の抑制特性
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松本洋介、天野孝伸、加藤恒彦、星野真弘
2. 発表標題 高マッハ数衝撃波における電子のサーフィン・ドリフト加速(口頭)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/~ymatumot/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	星野 真弘 (Hoshino Masahiro) (90241257)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授 (12601)	
研究分担者	加藤 恒彦 (Kato Tsunehiko) (90413955)	国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・特任専門員 (62616)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------