

平成29年9月25日  
国立大学法人 千葉大学  
国立大学法人 東京大学大学院理学系研究科  
大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台

## 宇宙線誕生過程の解明に大きく迫る スーパーコンピュータ「京」を使った1兆粒子シミュレーションで 強い天体衝撃波の3次元構造を世界で初めて解明

千葉大学大学院理学研究院ハドロン宇宙国際研究センター 松本洋介 特任准教授、東京大学大学院理学系研究科 天野孝伸 准教授、星野真弘 教授、国立天文台天文シミュレーションプロジェクト 加藤恒彦 専門研究職員の研究グループは、スーパーコンピュータ「京」を使った超大規模数値実験により、超新星爆発等によって発生する強い天体衝撃波の3次元構造を世界で初めて明らかにしました。約1兆個のプラズマ粒子の運動を追跡することで、「冷たいプラズマがどうやって宇宙線のエネルギーまで加速されるのか？」という宇宙線誕生過程の解明に大きく近づくことができたことから、本成果はアメリカ物理学会が発行するPhysical Review Letters誌に掲載されました。

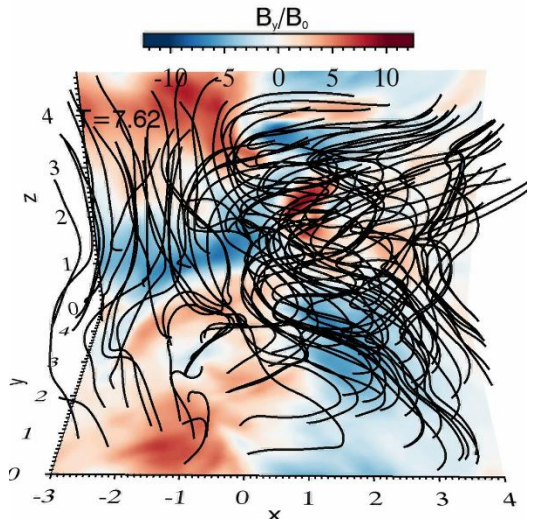
### ■ 研究の背景：宇宙から飛来する高エネルギー粒子誕生之谜

宇宙には高エネルギーの荷電粒子が飛び交っており、これを宇宙線と呼びます。その発見から100年以上たった現在においても、どのような物理メカニズムで冷たいプラズマ中の荷電粒子が10桁以上も高いエネルギーを持つ宇宙線へと変貌するかを理解することがチャレンジングな問題として残されています。

### ■ 研究の成果：スパコン「京」を用いた1兆粒子計算

松本洋介特任准教授らの研究グループは、スーパーコンピュータ「京」を駆使してプラズマの第一原理計算を行いました。その結果、冷たいプラズマ中の電子は衝撃波と相互作用する過程で、1. コヒーレント\*な電場の波に捕捉されながら加速されるサーフィン加速、2. 衝撃波面を横滑り（ドリフト）しながら、衝撃波面近傍の強い乱流磁場に繰り返し散乱されて加速する統計的加速の2段階の加速を経ることがわかりました。この強い乱流磁場による散乱を通して高エネルギー粒子を衝撃波面近傍の加速領域に長時間閉じ込め、加速し続けることが可能であることから、本研究が見出した2段階加速は冷たいプラズマと宇宙線粒子をつなげる有望な加速メカニズムとして期待されます。

(\* 波の形が揃った状態を表す)



計算から得られた衝撃波付近の3次元構造。  
カラーは磁場の強さ。実線は磁力線。  
クレジット：松本洋介（千葉大学）

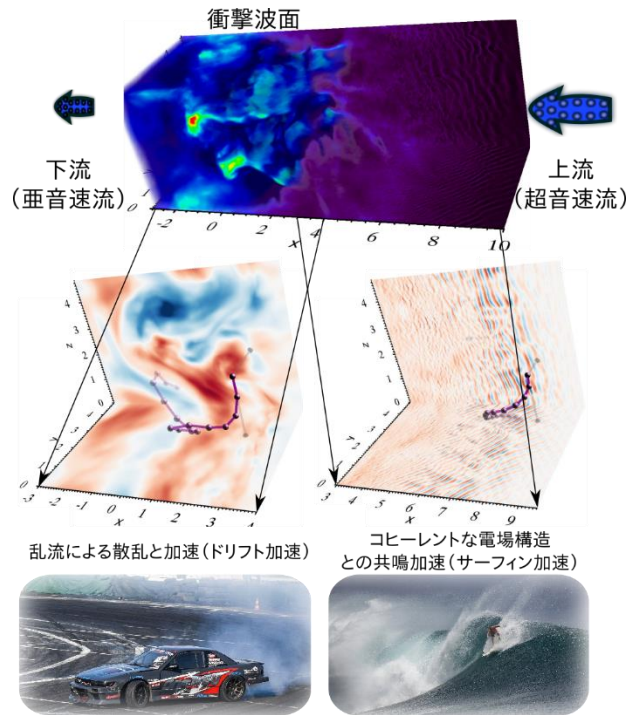
本件に関するお問い合わせ・取材のお問い合わせ

千葉大学大学院理学研究院・グローバルプロミネント研究基幹  
松本洋介 特任准教授  
TEL: 043-290-2737 メール: ymatumot@chiba-u.jp

## ■ 研究の詳細

研究グループはスーパーコンピュータ「京」が有する計算能力の約10%（73,728計算コア、100テラバイト物理メモリ）を駆使してプラズマの第一原理計算を行い、強い天体衝撃波の3次元構造を世界で初めて明らかにしました。ペタバイトに上る膨大なデータを解析することにより、冷たいプラズマ（本研究では電子）が相対論的なエネルギー（ほぼ光速で運動するエネルギー）まで加速する様子を示すことに成功しました。冷たい電子は衝撃波と相互作用する過程で、1. **コヒーレントな電場の波と共鳴する共鳴型加速**、2. **強い乱流磁場に散乱されながら加速する統計的加速**の2段階を経ることがわかりました。前者は波に捕捉されながら加速される様子からサーフィン加速と呼ばれ、後者は衝撃波面を横滑りしながら加速するドリフト加速と呼ばれます。

衝撃波面近傍で卓越する強い乱流磁場によってドリフト運動中の電子は散乱され、多くの粒子が下流へ流される間も上流側に留まり、加速し続ける粒子が存在することが明らかになりました。この強い乱流磁場によって高エネルギー粒子を衝撃波面近傍の加速領域に長時間閉じ込めることが可能であることから、本成果は冷たいプラズマと宇宙線粒子をつなげる有望な加速メカニズムとして期待されます。



図：（上段）衝撃波の3次元構造。色は電子密度を表す。（中段右）衝撃波の上流側で電場の波（色）と共鳴するサーフィン加速中の電子の軌道（球）を表す。（中段左）衝撃波近傍の強い乱流磁場（色）によって散乱されながら波面に沿って横滑り（ドリフト）する電子の運動の様子。Matsumoto et. al. PRL 2017より改編。（下段）それぞれの加速メカニズムに対応するイメージ図。

## ■ 今後の展望

超大規模数値実験が故、これまででは限られた条件下でしか加速メカニズムの性質を探ることができませんでした。冷たいプラズマから宇宙線に変貌する粒子の割合はどれくらいか？などの加速効率の問題が残されています。それらを明らかにするためには、今回と同様の大規模な実験を複数回繰り返す必要があります。また長時間計算を実施することで、宇宙線ができる様子まで再現できるかもしれません。いずれにしても、解析するデータがペタバイトクラスとなるため粘り強く研究に取り組む必要がありますが、その先には宇宙線の起源を明らかにすることができるかと期待されます。

## ■ 発表雑誌

雑誌名 : *Physical Review Letters* 119巻10号 (2017年9月8日)

タイトル : Electron surfing and drift accelerations in a Weibel-dominated high-Mach-number shock

著者 : Y. Matsumoto, T. Amano, T. N. Kato, and M. Hoshino

DOI : 10.1103/PhysRevLett.119.105101

本研究成果は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」（課題番号:hp150133, hp150263, hp160212, hp170231）及び国立天文台天文シミュレーションプロジェクトCray XC30「アテルイ」を利用して得られたもので、科学研究費補助金基盤研究(C) 26400266、文部科学省ポスト「京」重点課題9「宇宙の基本法則と進化の解明」および計算基礎科学連携拠点（JICFuS）により援助を受けて行われました。