



## ニュースリリース

平成 25 年 11 月 20 日

国立大学法人 千葉大学  
国立大学法人 東京大学

## 超高マッハ数プラズマ衝撃波のシミュレーションに成功

概要

千葉大学（学長：齋藤康）大学院理学研究科附属ハドロン宇宙国際研究センター 松本洋介 特任助教、東京大学（総長：濱田純一）大学院理学系研究科 天野孝伸 助教、星野真弘 教授らの研究グループは、スーパーコンピュータを用いた研究によって、**超高マッハ数プラズマ衝撃波において電子が相対論的エネルギーまで加速される様子を明らかにすることに成功しました。**極限的に強い衝撃波の描像が明らかになったことで、宇宙物理学の謎のひとつである「超新星残骸衝撃波における相対論的電子の存在」の解明に大きく迫ることができると期待されます。本成果は、11月22日（オンライン版は11月19日）発行の Physical Review Letters 誌に掲載されます。

背景

地球大気には常に宇宙から高エネルギーの粒子が飛び込んできています。このような高エネルギー粒子を宇宙線と呼び、いまから 100 年ほど前に V. F. Hess（ヘス）によって発見されました。太陽系外を起源とする  $1 \text{ PeV}^*$  以下の高エネルギー粒子の加速起源として、超新星残骸衝撃波<sup>\*2</sup>が有力視されています。近年の「Chandra」衛星や「すざく」衛星などによる X 線観測が超新星残骸衝撃波の近傍に非熱的<sup>\*3</sup>な相対論的エネルギーを持つ電子が存在することを明らかにしてきたことで、超新星残骸衝撃波起源説が強固なものとなっています。

衝撃波における荷電粒子の加速機構として衝撃波統計加速（一次フェルミ加速）が標準理論として知られています。この理論は、荷電粒子が衝撃波の上・下流に存在する電磁場によって散乱されることにより、何度も衝撃波面を横切りながらエネルギーを獲得するというものです。しかし、特に、磁場に強く巻き付く電子を散乱させるのは難しく、また、高エネルギー粒子を散乱できるような大振幅の電磁場擾乱が衝撃波上・下流に存在しうるのか、といった問題が残されていました。

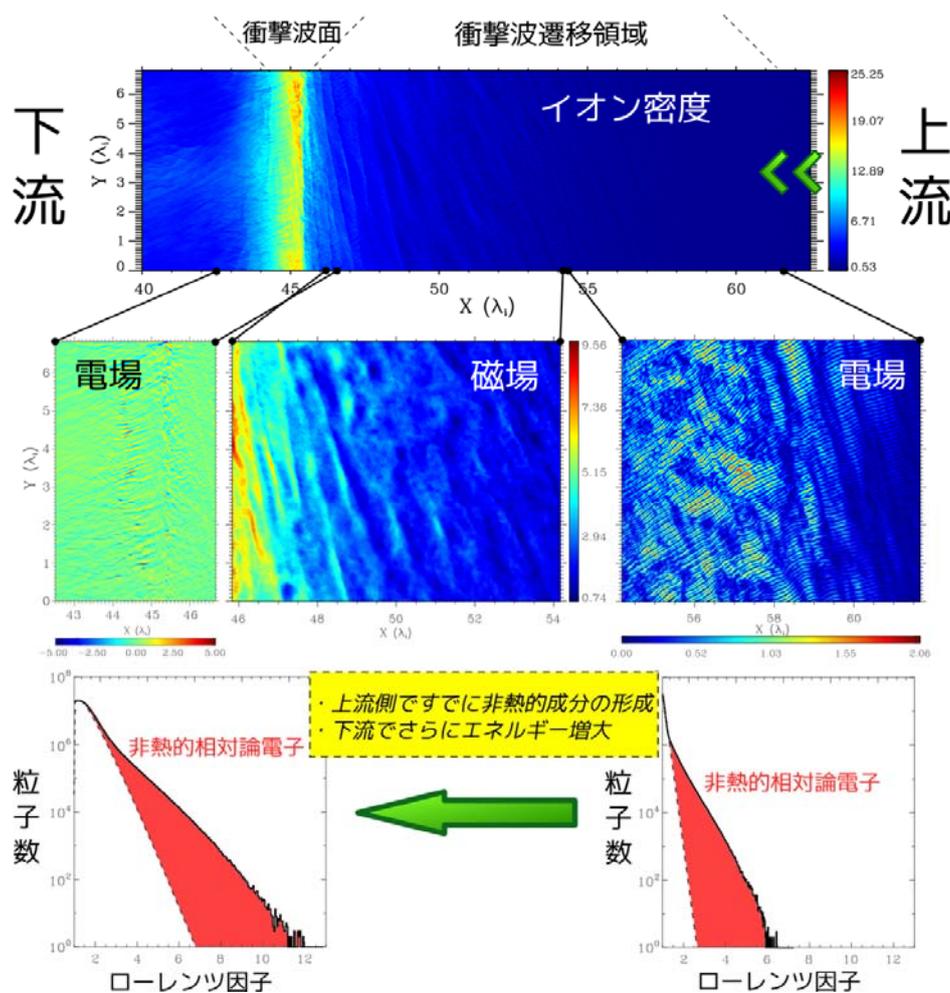


図. 2次元衝撃波構造中の電磁場擾乱と非熱的相対論電子生成

## 内容

本研究は、超新星残骸衝撃波のような非常に高いマッハ数<sup>\*4</sup>の下での無衝突プラズマ衝撃波<sup>\*5</sup>の構造とそれに伴った電子の加速メカニズムを初めて明らかにしたものです。速度分布が熱的なガウス分布に従う低エネルギー粒子群から熱的分布から外れた非熱的な高エネルギー粒子が生成されるといった、強い非線形過程を明らかにするためには、多数のプラズマ粒子の運動を追尾しながら電磁場の時間発展を計算する大規模な数値計算が要求されます。そのため、無衝突プラズマ衝撃波の多次元シミュレーションはこれまで容易なものではありませんでした。

松本洋介特任助教らの研究グループは、HPCI 戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」の支援の下、最新の超並列スーパーコンピュータ上において高速に実行できる particle-in-cell (PIC) 法に基づくプラズマ粒子シミュレーションコードの開発を行ってきました。本研究では、東京大学情報基盤センターの Fujitsu PRIMEHPC FX10 System (Oakleaf-FX) の1024個の計算コアを約500時間使って100億個のプラズマ粒子の運動と電磁場の時間発展を解き進めることにより、これまで探ることができなかった、アルヴェンマッハ数<sup>\*4</sup>~45といった超高マッハ数衝撃波の2次元構造を明らかにすることに成功しました（図上段、イオン密度空間分布）。

高マッハ数衝撃波では、イオン（陽子）の一部が衝撃波面で反射され上流に遡ると

いった、粒子的な振る舞いをする事が知られていました。極限的に強い衝撃波では、この「反射イオン」が、様々なプラズマ不安定性を励起して、衝撃波におけるエネルギーの再分配（散逸）過程において重要な役割を果たします。反射イオンは、衝撃波遷移領域先端で電子の旋回運動半径<sup>\*6</sup>スケールの非常に強い電場を励起し（図中段右）、また同時に衝撃波遷移領域ではイオンスケールの強い磁場の擾乱を生成することがわかりました（図中段中央）。さらに、衝撃波面では、波面に沿った電子スケールの電場が励起されていることがわかりました（図中段左）。

このような様々なスケールでの非常に大きな振幅を持つ電磁場擾乱の存在が超高マッハ数プラズマ衝撃波の特徴であることがわかりました。その中で、電子は、特に衝撃波上流の電子スケールの強い電場と相互作用することで、衝撃波面に到達する前に一気にエネルギーを獲得していることが明らかになりました。結果として、高エネルギー粒子で形成される非熱的成分を持った電子の統計的エネルギー分布がすでに衝撃波上流で形成され（図下段右）、さらに衝撃波下流では非熱的粒子の最高エネルギーがローレンツ因子<sup>\*7</sup>で10以上となる相対論的エネルギーに到達していることがわかりました（図下段左）。

### 今後の展望

以上の結果では、電子が“ある程度”加速されることがわかりましたが、それ以上のエネルギーに達する加速メカニズムの解明は依然、課題として残されています。宇宙線エネルギーまでたどり着くためには、冒頭で紹介した衝撃波統計加速機構が働く必要があると考えられますが、今回のシミュレーションではそこまで示すことができませんでした。そのためには、今回の結果では考慮できていない3次元性を考える必要があります。現在、ある程度加速された電子が更に大きなエネルギーを獲得する様子を明らかにすることを目指して、スーパーコンピュータ「京」<sup>\*8</sup>を用いた3次元PICシミュレーションによる研究が始まっています。

### 発表雑誌

雑誌名 : Physical Review Letters (online November 19, publish November 22)  
タイトル : Electron acceleration in a nonrelativistic shock with very high Alfvén Mach number  
著者 : Y. Matsumoto, T. Amano, and M. Hoshino  
DOI : 10.1103/PhysRevLett.111.215003  
URL : <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.111.215003>

## 用語解説

## \*1 PeV (peta electron volt)

eV はエネルギーの単位。1eV は荷電粒子が 1 ボルトの電圧差によって加速される際に得るエネルギー、で  $1.6 \times 10^{-19}$  ジュール。P は  $10^{15}$  の大きさを表す。

## \*2 超新星残骸衝撃波

超新星爆発で発生した爆風が星間物質と相互作用することによって無衝突プラズマ衝撃波 (\*5) が形成される。マッハ数 (\*4) は 100 を超える。

## \*3 非熱的

熱的平衡状態では粒子のエネルギー状態 (速度分布) はガウス (マクスウェル) 分布に従う。そのような熱的分布から外れた成分を非熱的という。熱的ガウス分布に対して非熱的成分は冪 (べき) 分布に従うことが多い。

## \*4 アルヴェンマッハ数

衝撃波のマッハ数とは、衝撃波から見た上流側速度  $U$  と媒質中を情報が伝達する速度  $C$  との比、 $M=U/C$  で定義される量で、衝撃波の強さを表す指標になる。通常、 $C$  は音速度であるが、磁化プラズマ中では磁場の擾乱が伝わる速度であるアルヴェン速度が使われ、通常のマッハ数と区別してアルヴェンマッハ数と呼ばれる。

## \*5 無衝突プラズマ衝撃波

宇宙空間のガスの大部分は電離した高温プラズマ状態で、しばしば、粒子間の衝突がない無衝突プラズマとして扱われる。無衝突プラズマによって形成される衝撃波を無衝突プラズマ衝撃波といい、エネルギー散逸は電磁場を介して行われる。

## \*6 旋回運動半径

荷電粒子の運動は磁場によるローレンツ力によって曲げられる。その旋回運動の曲率半径を旋回運動 (ラーモア) 半径という。

## \*7 ローレンツ因子

ローレンツ因子は  $\gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$  で定義される。ここで、 $v$  は粒子の速度、 $c$  は光速を表す。質量  $m$  の粒子のエネルギーは  $mc^2\gamma$  で表されるため、ローレンツ因子はエネルギーを静止エネルギー  $mc^2$  で割ったものに相当する。 $\gamma \gg 1$  の時、粒子のエネルギーは相対論的という。

## \*8 スーパーコンピュータ「京」

文部科学省が推進する革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI) の中核をなすスーパーコンピュータ。理化学研究所と富士通により共同開発され、2011 年に世界で初めて 10 ペタ (1 京) フロップス (1 秒辺りの浮動小数点演算回数) を達成した。

<<本件に関するお問い合わせ先>>

千葉大学大学院理学研究科 松本洋介

Tel : 043-290-2737 Fax : 043-290-3721

E-mail : ymatumot@astro.s.chiba-u.ac.jp