

平成30年度名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクト成果報告書

東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻 岩本昌倫

研究課題名：相対論的無衝突衝撃波における航跡場加速の数値的研究

宇宙線の起源は、宇宙物理学における最重要未解決問題である。 $10^{15.5}$ eV 以下の宇宙線は、銀河系内の超新星残における衝撃波で、フェルミ加速により生成されているというのが通説である。しかし、 $10^{15.5}$ eV 以上の超高エネルギー宇宙線の起源は分かっていない。観測的には、超高エネルギー宇宙線の飛来方向から生成場所の同定が試みられているが、確たる結論には至っていない。理論的には、活動銀河核のジェットやガンマ線バーストといった高エネルギー天体が起源(e.g., Hillas 1984, ARA&A)だと信じられている。これらの天体は一般に亜光速のプラズマ流を吹き出しており、それが周囲の星間物質と相互作用することで天体衝撃波が形成される。この天体衝撃波において何らかの粒子加速機構がはたらき超高エネルギー宇宙線が生成されていると一般に考えられている。しかし、天体衝撃波は多くの場合相対論的な無衝突プラズマであり、相対論的無衝突衝撃波となっている。その物理過程は相対論と非線形プラズマ物理に支配された極めて複雑な系のため、天体衝撃波での粒子加速の理解は困難を極めている。

超高エネルギー宇宙線の起源を巡る最大の問題は、相対論的無衝突衝撃波では粒子加速の標準理論であるフェルミ加速が非効率となることであり、長らく代替機構が必要とされてきた。実験室プラズマでは、コヒーレントな大振幅電磁波の輻射圧が励起した電場(航跡場)により粒子を加速するレーザー航跡場加速(Tajima & Dawson 1979, PRL)が知られており、最先端技術の超高強度レーザーを利用して広く研究されている。相対論的衝撃波ではシンクロトロンメーザー不安定により高強度コヒーレント放射が実現される (e.g., Langdon et al. 1988, PRL)ことが示されており、申請者はレーザー航跡場加速の天体衝撃波への応用に着目した。航跡場加速による超高エネルギー宇宙線生成の可能性が指摘されており(Chen et al. 2002, PRL)、また粒子のエネルギースペクトルが宇宙線に近い冪型分布になるという実験結果(Kuramitsu et al. 2011, PoP)もあり、有望な加速機構である。

1次元系の相対論的無衝突衝撃波における航跡場加速は数値計算により実証されており(Hoshino 2008, ApJ)、さらに我々のこれまでの研究により多次元系でも高強度コヒーレント放射が持続し、航跡場を励起するのに十分な強度を保持している(Iwamoto et al. 2017;2018, ApJ)ことが分かっている。このことから、第一原理に基づく粒子コードを用いて、2次元系の相対論的無衝突衝撃波の数値シミュレーションを行った。計算の結果、大振幅電磁波が衝撃波上流に伝搬して電場を励起しており、さらには電子・イオンがともに衝撃波上流で加速されていることがわかった(図 1)。超高エネルギー宇

宇宙線の主要な成分は陽子であるため、特にイオンが加速されたことは宇宙線生成にとって極めて重要である。これらは 航跡場加速が天体衝撃波で起こり、超高エネルギー宇宙線を生成していることを強く示唆しており、宇宙物理学における大問題である超高エネルギー宇宙線の起源の解明に向けた世界最先端の成果である。以上の成果は論文としてまとめ、査読付き国際学術雑誌”Physical Review Letters”に投稿準備中である。

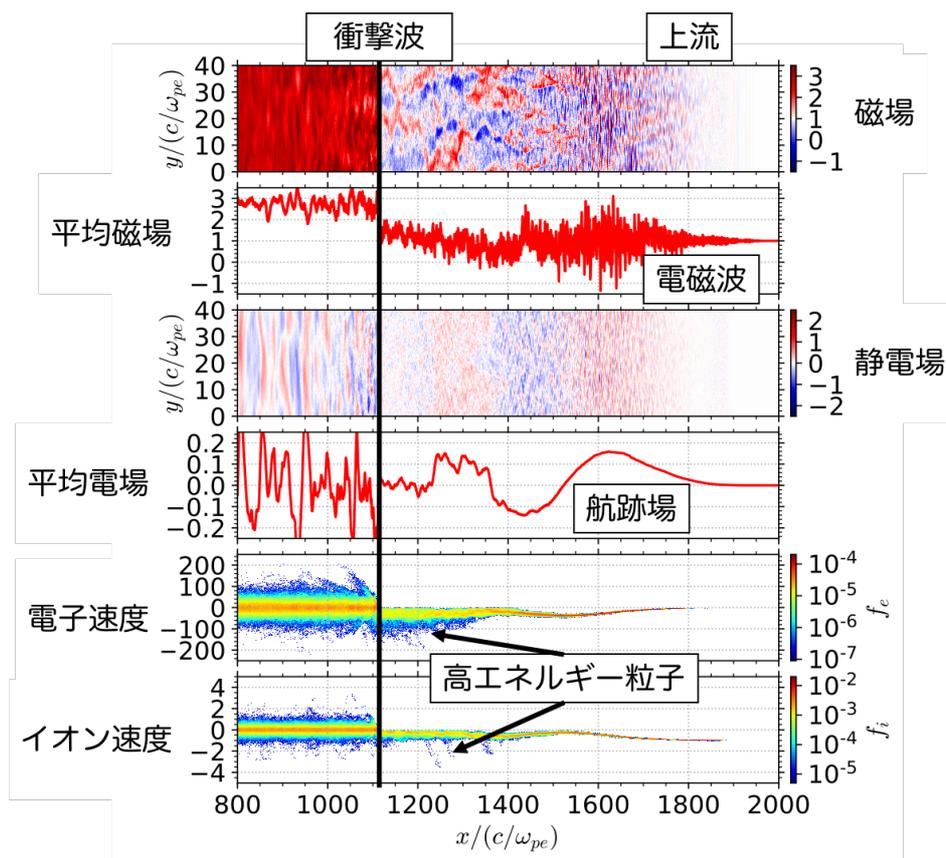


図 1 航跡場による粒子加速