

2019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

九州大学 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、その発見から100年以上経過した今日でも、宇宙物理学における未解決問題として残されている。 $10^{15.5}$ eV以下の比較的低エネルギーの宇宙線については、銀河系内超新星残骸の無衝突衝撃波におけるフェルミ加速により生成されているというのが標準模型となっている。一方、 $10^{15.5}$ eV以上の高エネルギー宇宙線の起源はほとんど分かっていないが、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での超高エネルギー宇宙線生成の可能性は古くから指摘されており(e.g., Hillas 1984, ARA&A)、観測も肯定的な結果を与えている。これらの天体は、一般に亜光速のプラズマ流を中心から吹き出しており、それが星間物質と相互作用することで相対論効果が無視できない無衝突衝撃波、「相対論的無衝突衝撃波」を形成する。相対論的無衝突衝撃波での粒子加速は、超高エネルギー宇宙線の生成メカニズムとして広く受け入れられている。

しかしながら、相対論的無衝突衝撃波は標準的な粒子加速機構であるフェルミ加速の効率が低下してしまうこともまた広く知られており、多くの代替機構が研究されてきた。その中でも本研究は航跡場加速に着目した。相対論的無衝突衝撃波ではシンクロトロンメーザー不安定により大振幅電磁波が上流に放射され、電磁波が輻射圧により電子を弾き飛ばすことで高強度の静電場(=航跡場)が励起される(Lyubarsky 2006, ApJ; Hoshino 2008, ApJ)。この航跡場によって粒子を直接加速するというのが航跡場加速の基本原理である。航跡場加速は、実験室プラズマにおいて超高強度レーザーを用いた粒子加速機構として提唱されたもの(Tajima & Dawson 1979, PRL)を、相対論的衝撃波に応用したものである。航跡場加速は標準理論を上回る粒子加速効率を持ち、さらには、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レーザー実験の結果(Kuramitsu et al. 2011, PoP)もある。そのため、航跡場加速は超高エネルギー宇宙線の粒子加速機構として有望である。

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、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、今年度は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新たに行った。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)。また、電子・イオンのエネルギー

スペクトルはともに宇宙線に近い冪型の分布をしており、レーザー実験の結果とも整合的である。これらは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。本成果はすでに論文としてまとめ、査読付き国際学術雑誌”The Astrophysical journal Letters”から出版されている(Iwamoto et al. 2019, ApJL)。

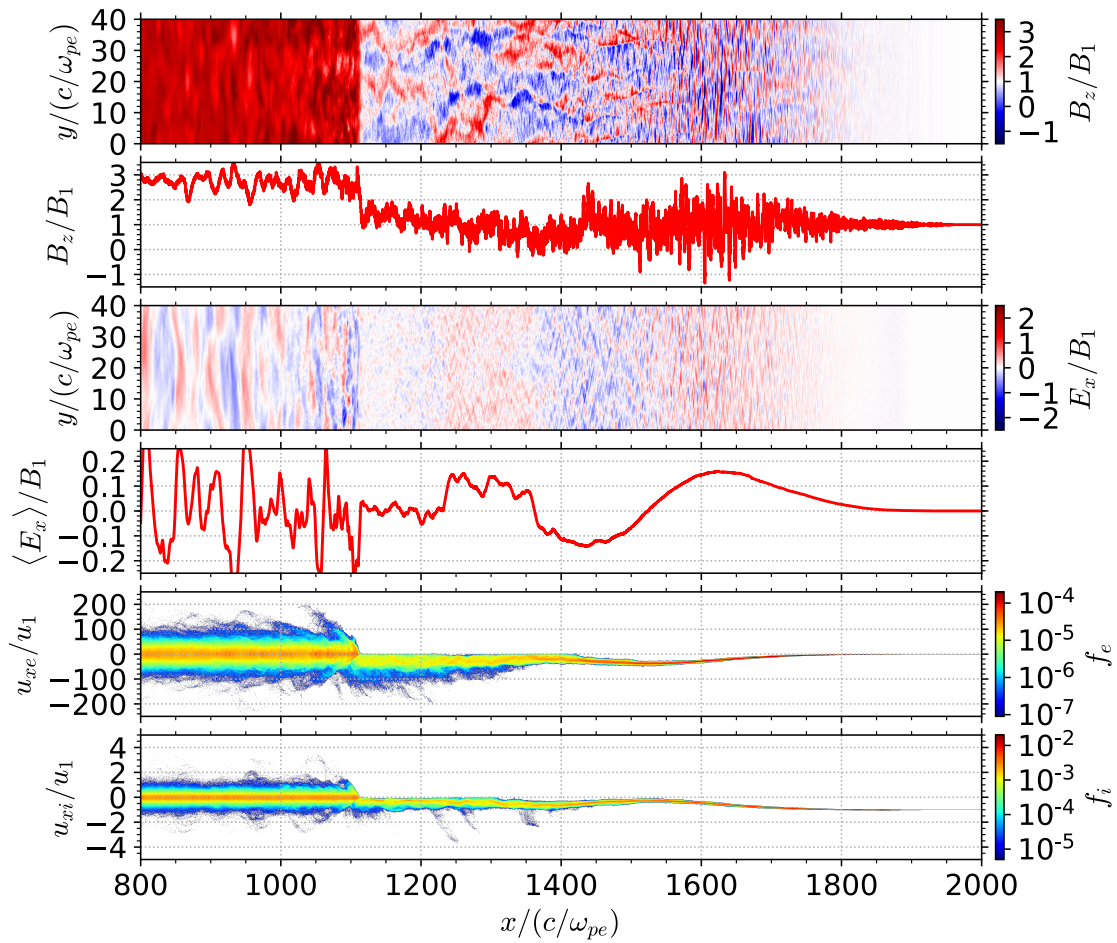


図 1 : 航跡場の励起と粒子加速