

無衝突衝撃波における粒子加速
Particle Acceleration in Collisionless Shocks

星野 真弘
Masahiro Hoshino

東京大学大学院理学系研究科
The University of Tokyo, Graduate School of Science

無衝突プラズマ系では、プラズマ加熱に伴い熱的エネルギーを凌駕する非熱的高エネルギー粒子がしばしば観測される。高温希薄なプラズマで満たされている宇宙においても同様で、例えば、太陽フレアや磁気圏における磁気リコネクション、超新星爆発衝撃波、ガンマ線バーストや活動銀河核ジェットでの衝撃波でも、非熱的高エネルギー粒子が作られている。このような宇宙で生成されている高エネルギー粒子（宇宙線）はHessの発見から100年以上経つが、その加速機構には未解決課題が山積している。

無衝突衝撃波による粒子加速機構としては、これまで統計フェルミ加速が有力な物理機構として議論されてきており、荷電粒子が衝撃波の上流および下流域の乱流場で散乱され衝撃波横切って何度も往復することでエネルギーを獲得するモデルが広く受け入れられている。しかしこの機構が働くには、粒子のジャイロ半径が衝撃波の厚み程度になるまで加速されることが必要である。この初期加速の課題は、注入問題と呼ばれており、衝撃波面近傍での極めて非線形のプラズマ過程に支配される波動と粒子の相互作用の理解が必要であり、我々の理解は未だに乏しい。特に電子の注入問題は、イオンに比べてそのジャイロ半径が小さいため、効率よい初期加速機構が必要である。本講演では、最近のプラズマ粒子シミュレーションやレーザー実験等の研究成果を踏まえて、初期加速を担う波動励起について紹介する。

無衝突衝撃波は、臨界マッハ数（マッハ数3程度）を超えると、衝撃波面のダイナミックな変動が発現し、多種多様の大振幅波動が励起されることが知られている。また衝撃波の性質は、マッハ数、プラズマ温度、衝撃波面に対する磁場配位などに依存し、これらのパラメタによってプラズマ波動の性質が大きく異なることも知られている。図1に示したのは、宇宙空間で観測される様々な衝撃波を衝撃波速度とアルフベン速度

でまとめたものであるが、衝撃波注入問題の理解には、異なるパラメタ空間における初期加速に有効なプラズマ不安定を同定し、その性質を理解することが必要である。

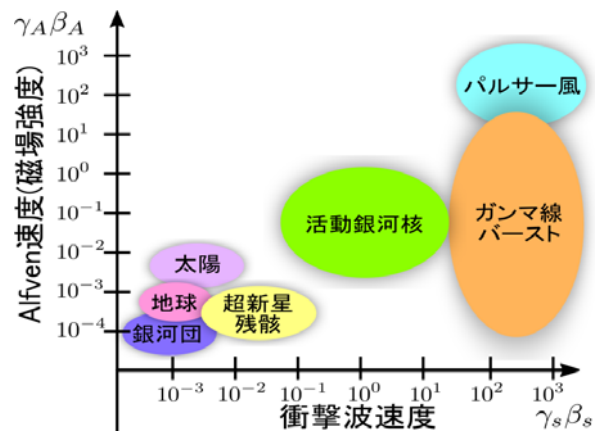


図1 プラズマ宇宙で観測される衝撃波

まず超新星残骸衝撃波では、10TeVにも達する相対論的電子によるシンクロトロン放射が観測されているが(Koyama et al. Nature 1995)、光速の数%から10%程度で伝搬する衝撃波のマッハ数は100程度以上を超えるのが一般的である。高マッハ数の衝撃波での電子加速は、近年粒子シミュレーションで精力的に調べられてきた (e.g., Hoshino & Shimada, ApJ, 2002; Amano & Hoshino, ApJ, 2009; Matsumoto et al. Phys. Rev. Lett., 2013)。大きく二つの加速機構が重要であると考えられており、ひとつは反射イオン領域(foot)で Buneman 不安定により励起された静電場による電子波乗り加速であり、もうひとつが衝撃波面近傍での Weibel 不安定により形成された磁気島との相互作用による加速である (Matsumoto et al., Science, 2015)。図2は、衝撃波近傍でのプラズマ密度と磁力線であるが、衝撃波面近傍でイオン慣性長スケールの磁気島が作られ、電子が磁気島と相互作用することで初期加速が起きていることが分かってきた。

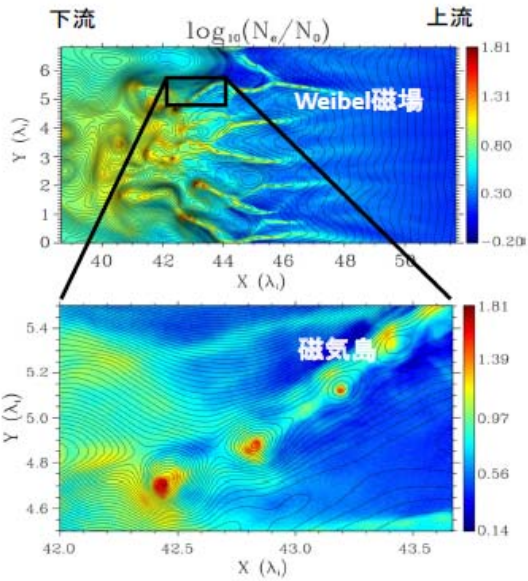


図2 2次元 PIC 衝撃波での磁気島形成と乱流加速 (磁力線と密度)

次に衝撃波に流れ込む流速が相対論的速度となる活動銀河核、ガンマ線バースト、パルサー風などは、 10^{20}eV にも達する高エネルギー粒子が加速されていると考えられている。相対論衝撃波の特徴として、大振幅の電磁波が衝撃波上流に先駆波として伝搬することである。先駆波は衝撃波でのシンクロトロン・メーザー不安定により励起されるが、弱磁場の衝撃波では大振幅の電磁波を励起できるので航跡場加速の可能性が議論されている (Lyubursky ApJ 2006; Kuramitsu et al. ApJ 2008; Kuramitsu et al. Phys. Rev. E, 2011; Iwamoto et al. ApJ 2017, 2018)。図3に示したのは2次元 PIC シミュレーションの結果であり、左側領域が密度と磁場が圧縮された衝撃波下流、右側が上流に対応。上流域に大振幅の先駆波 (電磁波) が伝搬していること、粒子加速が起きていること (not shown here) が分かっている (e.g. Hoshino ApJ 2008)。

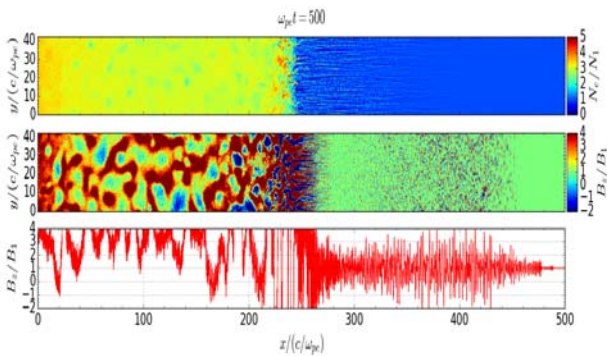


図3 上から密度と磁場のカラーの等高線、下図が磁場のx軸に沿った波形。右側が上流、左側が下流に対応。

レーザー実験でも興味深い成果が得られている。例えば、非磁化状態の双方向プラズマ流衝突で衝撃波をつくる実験がローレンスリバモアのNIF、米国ロチェスター大のOmega、阪大レーザー研の激光XII号などで始まっており、シミュレーション研究と相補的な研究が進んでいる。激光XII号では静電衝撃波の形成に成功し (Sakawa et al. Adv. Phys.:X 2016)、レーザー強度を更に上げると、Weibel不安定による自己磁場生成により磁気音波の衝撃波へと発展することが予想されている (Kato & Takabe, ApJ 2008)。図4は、Omegaでのレーザー実験であるがWeibel不安定による磁場発生が確認されている (Huntington et al. Nature Phys. 2015)。

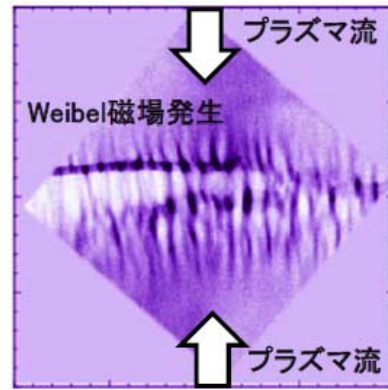


図4 Omega 実験 radiography、上部と下部からの双方向プラズマ流で発生したWeibel 磁場

以上のように衝撃波はプラズマ波動の宝庫であり、講演ではこれらの波動と粒子の初期加速・加熱研究の現状と展望について議論する。

謝辞 本稿の内容は、共同研究者である天野孝伸氏、松本洋介氏、松清修一氏、加藤恒彦氏、岩本昌倫氏、坂和洋一氏、蔵満康浩氏らと執筆した論文等をもとにしております。