

パワーレーザーを用いた実験室宇宙物理学 ——レーザー宇宙物理学の進展

坂和洋一 〈大阪大学レーザー科学研究所 sakawa-y@ile.osaka-u.ac.jp〉

大型の**パワーレーザー**を用いた実験室宇宙物理学、「**レーザー宇宙物理学**」が推進されている。数ある宇宙物理学のテーマの中で、この研究分野では**プラズマ**宇宙物理学をターゲットにしている。パワーレーザーをターゲットに照射して、レーザーでしか作り出せないような高温・高密度・高流速の極限プラズマ状態を実現し、ミクロな物理量と、マクロ構造を同時に計測することによって、宇宙現象の素過程を明らかにすることを目指している。

宇宙はプラズマで満たされており、様々な天体でベキ乗のエネルギースペクトルを持つ非熱的高エネルギー粒子、宇宙線が生成されている。宇宙プラズマでの標準的な宇宙線の生成機構として**無衝突衝撃波**と**磁気リコネクション**等が提案されている。

超新星爆発で生じる超新星残骸や、ガンマ線バースト等の天体現象では普遍的に衝撃波が発生する。これらの宇宙プラズマ衝撃波は、荷電粒子間衝突の平均自由行程が遷移層のサイズよりもはるかに大きく、無衝突プラズマ中に発生する衝撃波であり、無衝突衝撃波と呼ばれている。

粒子間衝突で生成される通常の（衝突）衝撃波は、衝撃波上流の粒子の運動エネルギーを衝撃波下流における熱エネルギーに変換する、加熱器の役割を持つ。無衝突のプラズマ衝撃波では、これに加えて、プラズマ中の電場・磁場と荷電粒子の相互作用によって、上流粒子よりも大きな運動エネルギーを持つ粒子の生成、すなわち、加速が行われる。この無衝突衝撃波による粒子加速が宇宙線の生成機構の1つと考えられている。

また、衝撃波近傍には乱流状態の高強度磁場が存在しており、無衝突衝撃波による粒子加速には乱流磁場生成・増幅が大きな役割を果たしていると考えられている。

磁気リコネクションは、磁場のエネル

ギをプラズマの熱や運動エネルギーに変換する物理過程で、太陽フレアや惑星磁気圏、乱流中での加速機構と考えられている。

これらの加速や磁場増幅の物理機構を説明するには、衝撃波や磁気リコネクションでの複雑な電磁場構造や、荷電粒子の集団的な振る舞いの理解が必要となる。天体のリモート観測では、衝撃波や電磁場の物理量を詳細に計測することは困難である。

一方、無衝突衝撃波や磁気リコネクションにおける密度・温度分布や磁場構造は、人工衛星による実時間計測（「その場」観測）によって明らかになってきた。しかし、「その場」観測では、現象の大域構造を計測することができず、時間と空間の変動を分離することが難しい。

レーザー宇宙物理学では、多数の計測器を同時に用いて、天体のリモート観測では得られない衝撃波や磁場のミクロな物理量と、人工衛星による「その場」観測では得られないマクロ構造を同時に計測し、現象の時間と空間の変動を分離することができる。

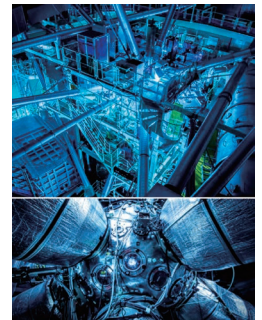
大阪大学レーザー科学研究所のパワーレーザー、激光 XII 号では無衝突衝撃波生成、乱流磁場増幅、磁気リコネクションなどの多様なレーザー宇宙物理学実験が実施されている。

例えば、無衝突衝撃波生成実験では、衝撃波上流のプラズマが次第に圧縮されて衝撃波が形成されていく様子が初めて観測された。乱流磁場増幅実験では、星間空間での衝撃波による磁場増幅過程が初めて実験的に検証された。磁気リコネクション実験では、プラズマ中で磁力線が繋ぎ変わるとともに荷電粒子が加熱・加速される様子と、局所的なプラズマ挙動を計測することに成功した。さらに、電子が駆動する磁気リコネクションが再現され、イオン運動を伴わない電子のみの加速が初めて観測された。

用語解説

パワーレーザー：

短時間に高エネルギーを出力するため、パルスあたりのピークパワーが非常に大きなレーザー。大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号レーザーは12本のビームを有し（上図）、約700 J/beamを約1 ns (10^{-9} 秒) という短時間に、直径約2 mの真空容器（下図）内に設置したターゲットの約1 mmの領域に照射する。



レーザー宇宙物理学：

パワーレーザー装置を用いて高温・高密度・高流速のプラズマ状態を実現し、宇宙現象の素過程を明らかにする研究。

プラズマ：

電荷を帯びた粒子（電子とイオン）の集団で、物質を加熱することで得られる固体・液体・気体に次ぐ第4の状態。宇宙の観測可能な物質の99.9%以上がプラズマと考えられている。

無衝突衝撃波：

無衝突プラズマ中での衝撃波。宇宙プラズマでの標準的な粒子加速機構の1つと考えられている。

磁気リコネクション：

プラズマ中で反平行磁場で生じる電流の散逸によって、磁場のエネルギーをプラズマの熱・運動エネルギーへと変換する物理過程。