

高強度レーザー駆動の相対論プラズマの凍り付きと 非断熱的な無衝突衝撃波構造の形成

Frozen-in of relativistic plasma induced by high intensity laser and formation of non-adiabatic collision-less shock structure

岸本泰明、松井隆太郎、増井英陽、今寺賢志
Y. Kishimoto, R. Matsui, H. Masui, K. Imadera

京都大学大学院エネルギー科学研究科
Graduate School of Energy Science, Kyoto University

近年、CPA法の発明(Mourou/Askin)による高強度レーザー技術の革新により加速電子のエネルギーが相対論領域の高強度レーザーと物質と相互作用を利用した多彩な研究が展開されている。その一つが高エネルギーのイオン加速であり、コンパクトな特性を利用した医療への応用などが期待されている。ターゲットに固体薄膜を使用してその裏面に形成されるシース場[1]を利用するもの、プラズマ中に形成される衝撃波[2]を利用するもの、極薄膜によるレーザーの輻射圧[3]を利用するもの、レーザーが透過する臨界密度近傍プラズマの裏面に形成される磁気渦の圧力を利用するもの[4]などが提案され実験的な研究も進展している。

一方、ターゲットにクラスターと呼ばれる μm オーダの水素の粒状物質を使用し、これにパルス長が数10fsで集光強度が 10^{20} W/cm^2 オーダの高強度レーザーを照射することで、方向性を持った求心衝撃波の生成と集束時に現出するレーザーの相対論的透過化に伴う瞬時的な荷電分離電場を利用する方(CSBA : Convergence Shock induced Blow-off Acceleration)が提案された[5]。この粒状物質は高圧水素ガスの真空中への噴出によって作製することから医療応用などに求められる連続運転には適している反面、物質のサイズや位置が確率的になることから実用化には工夫が求められる。また、異なったイオン種や確率性を排除した2次元円柱(ロッド)や1次元平板などへの拡張も期待される。

特に、衝撃波(イオン系構造)の形成、伝播・集束による密度の増大、レーザーの相対論的透明化と電子の瞬時的荷電分離、それに駆動されるブローオフ現象とイオンの反射・加速、粒状物質表面に形成されるクーロン電場による再加速など、複数の素過程が同期することでイオ

ンに対しても光速に隣接する300MeV/u を上回る加速が可能であることから、そのメカニズムの解明は重要である。CSBAは“convergence(集束)”という形状効果を強調した名称であるが、現象は1次元的な要素を多く含む。また、複数の現象の“同期(synchronization)”が狭いパラメータ領域において起きた現象か、相対論的な非線形性に起因する自己組織化的な現象なのかは現象の普遍性の観点から興味深い。

本報告では、この視点に立ち、高強度レーザーと水素を含む軽元素との相互作用とその過程でも衝撃波形成のダイナミクスを主に1次元及び2次元配位で考察する。集光強度が $10^{21-22} \text{ W/cm}^2$ でパルス長が数10fsオーダのレーザー照射では電子密度に100%のオーダの粗密が起きるとともに、イオン密度も揺らぎレベルの高い乱流的な状態になる。その後、イオン密度は位相整合の過程を通して指数関数的(線形不安定性的)もしくは爆発的な増大を示し、衝撃波を形成する。この過程において n_i/γ (イオン密度/相対論因子)は一定に保たれプラズマ周波数が“凍り付く”傾向があることなどがあることも分かった[6]。これらはパルス幅がナノ秒領域の断熱的な衝撃波形成と異なり、非断熱的であり、流体的インスタントン[7]の描像と類似している。これらの詳細について報告する。

- [1] Kishimoto et al., Phys.Fluids **26**, 2308 (1983),
- [2] Malkov et al., Phys. Plasmas **23**, 043105 (2016),
- [3] Esirkepov et al., PRL. **92** 175003 (2004)
- [4] Fukuda et al., PRL **103**, 165002 (2009)
- [5] Matsui et al., PRL **122**, 014804 (2019)
- [6] Tsintsadze et al. Phys. Scripta **T84** (2000)
- [7] Dematteis et al., PRX **9**, 041057 (2019)