OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	キロテスラ級磁場下における超高強度レーザープラズマ相互作用の物理
Author(s)	畑, 昌育
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2017, 7, p. 25-27
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/70520
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

キロテスラ級磁場下における超高強度レーザープラズマ相互作用の物理

畑 昌育
大阪大学 レーザー科学研究所

1. はじめに

1994 年の CPA 技術の発見[1]により、レーザーの出力は飛躍的に向上し、2 PW という大出力レーザーを建設することが可能となっている。この出力のレーザー光を数ミクロン程度のスポットまで絞ると、10^{22} W/cm^2 という超高強度の光を作り出すことができる。我が国では、量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所にて開発されている J-KAREN レーザーがこのような超高強度レーザー装置に該当し、その各種パラメータは 30 J、30 fs、1 PW となる見込みである[2]。また、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターには、レーザー強度では 10^{20} W/cm^2 程度と劣っているもののエネルギー量で J-KAREN レーザーを大きく上回る LFEX レーザーがあり、世界最高の出力性能を誇っている[3]。そのパラメータは 3 kJ、1.5 ps、2 PW である。また、世界的にも大出力超高強度レーザーの建造が急ピッチで進められており、今後、米国、欧州、中国などで複数の装置が稼働する見通しである。これらのレーザーは主に、核融合、核物理、宇宙物理といった基礎研究から、発生する高エネルギー量子線の基礎研究応用・医療応用といった応用研究まで幅広く利用される。このような状況の中、阪大レーザー研では、FIREX プロジェクトという高速点火レーザー核融合研究プロジェクトが立ちあげられ、今日まで精力的な研究が実験・理論の両面から行われてきている[3]。

高速点火方式レーザー核融合のシナリオを、図 1 に示す。まず、爆縮レーザーを四方八方から照射する（①）。これにより、ターゲット表面は瞬時にプラズマ化し、プラズマ膨張の反作用によりターゲットが圧縮される（②）。そして、最大圧縮時に、噴出プラズマのないコーン内に超高強度レーザーを投入しコーンとの相互作用により生成された高エネルギー電子を用いてコアを加熱する（③）。最後に点火・燃焼が起こる（④）。研究グループは、これまでの研究により、本方式の数々の課題を明らかにし、それらの克服に向けて研究を進めてきた。近年大きな問題となっていることの 1 つに、図 1 のステップ③において生成される高エネルギー電子が大きな発散角を持ち、生成点がコアから離れていると爆縮コアにエネルギーを落とせないというものがある。そのような中、2013 年に高出力レーザーを用いることで、実験室においてキロテスラ級の強磁場を生成できることが報告され、強磁場を使って、レーザー生成高エネルギー電子を効率よくコアまで輸送する方法が提案された[4、5]。

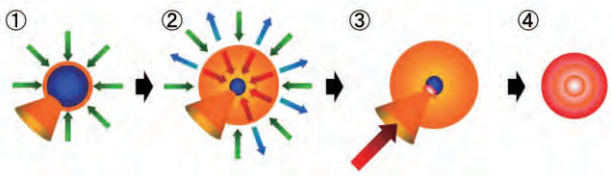

図 1　高速点火方式レーザー核融合のシナリオ

磁場とプラズマとの歴史は長く、磁場閉じ込め核融合や宇宙プラズマでは数多くの研究がなされてきているが、レーザープラズマの分野ではそれほど研究例は多くない。レーザープラズマの特徴として、非常に短い時間スケール（プラズマ振動の時間スケール）と超高強度の電磁波（電子が相対論領域まで加速される程強い電場）、そして生成されるプラズマが高エネルギー密度状態であることが挙げられる。近年生成可能になった強磁場環境と高エネルギー密度状態（レーザー生成プラズマ）の二つの極限状態の組み合わせは、これまで実験することのできなかったパラメータ領域であり、未踏の研究領域である。

本研究では、強磁場中の超高強度レーザーとプラズマとの相互作用について相対論的電磁粒子コードを用いた計算機シミュレーションを行い、その物理を明らかにする。

2. 相対論的電磁粒子コード

相対論的電磁粒子コードとは、荷電粒子の運動方程式および Maxwell 方程式をカップリングして解くコードであり、電磁場とプラズマとの相互作用を自己無道着に解くことができる。電磁場は格子量として扱われ、Maxwell 方程式を時間・空間的に差分化する。荷電粒子は粒子として扱い、運動方程式を時間的に差分化する。計算のアルゴリズムは図２に示すような順になり、①粒子の位置・速度から電荷密度・電流密度を計算、②電荷密度・電流密度から電磁場を更新、③電磁場から力を計算、④力から粒子の位置・速度を更新となる。このループを計算したい時間分だけ繰り返し、計算を実行する。粒子コードの詳細については、C. K. Birdsall の本などを参照されたい[6]。

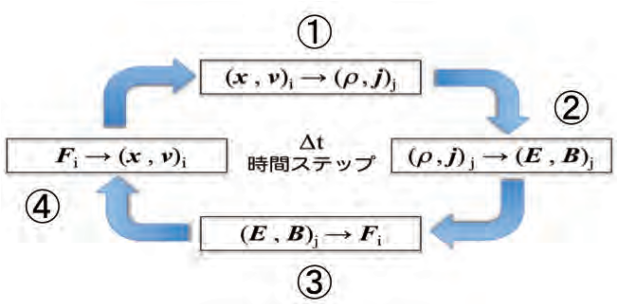

図２　粒子コードの計算アルゴリズム

一般に、粒子コードでは、電磁場よりも荷電粒子の計算が重たいため、粒子のループについて並列化を行うことで大幅な計算時間の短縮が可能となる。また、大規模な計算をする場合には、大量のメモリが必要となるため、領域分割による並列化を行い、担当する領域の電磁場と粒子のみを解くようにすればよい。

3. 強磁場下レーザープラズマ相互作用

3. 1　シミュレーション条件

考える系はシンプルかつ実験に近いものを扱い、複数回の実行が可能な計算規模（時空間サイズ）に設定した。レーザーやプラズマのパラメータは実験に近い条件をなるべく採用した。レーザーは空間的にはガウシアン、時間的には矩形のプロファイルを持つものを想定し、最大強度 4×10^{18} W/cm^2、波長 1 μm、スポット径(FWHM)20 μm、パルス幅半無限の直線偏光とした。ターゲットは、レーザーのメインパルスに先行する比較的低強度ではあるが長パルスであるプリパルスによってあらかじめプラズマ化・膨張しているとして、スケール長 20 μm のプリプラズマ付き CH プラズマを置いた（図３）。そして、外部磁場として x 方向に平行磁場を印可した。外部磁場強度は 0、0.5、1、5 kT と振って 500 fs のシミュレーションを実施した。

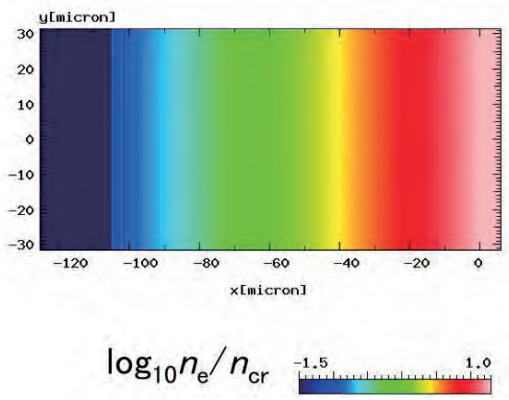

図３　ターゲットの初期電子密度

3. 2　電場、電子密度、磁場における構造形成

図４に 500 fs におけるレーザー周期平均電場強度および電子密度の二次元プロファイルを示す。磁場なしと 0.5 kT とでは大きな違いはないが、5 kT の場合には、レーザー場のフィラメント構造が磁力線方向に直線的に伸びる傾向があることがわかった。

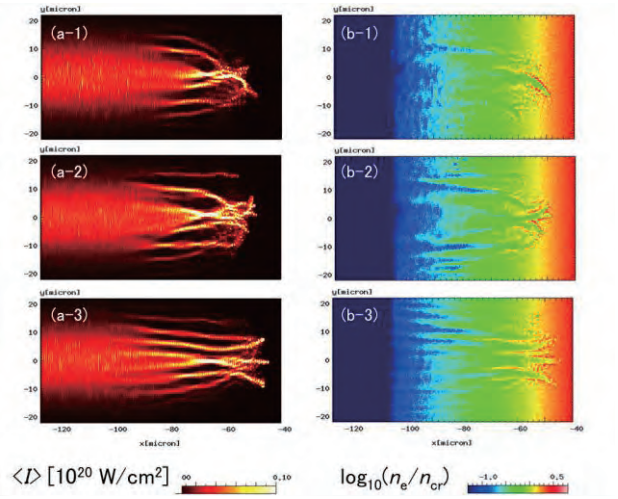

図４　外部磁場なし(1)と外部磁場(2)0.5 kT、(3)5 kT の場合の t = 500 fs におけるレーザー周期で平均した電場強度(a)と電子密度(b)の二次元プロファイル

これに付随して、電子密度プロファイルにおける構造も直線的になっている。この現象は外部磁場によって磁力線垂直方向の運動が阻害されたことによるものであると考えられる。図５に、外部磁場が 0.5 および 5 kT の場合の 500 fs におけるレーザー周期平均磁場 B_x の二次元プロファイルを示す。磁場 B_x においても構造形成が起きており、初期に印加した磁場が強められている箇所と弱められている箇所があることがわかる。この磁場の強弱は、レーザー場および電子密度における構造形成と同じ場所にできており、フィラメント内では、電子の排斥が起こっており、磁場が弱くなっていた。そして、フィラメント周辺部では、押し退けられた電子の堆積および磁場の圧縮が起き、初期磁場よりも強い磁場が生じていることがわかった。

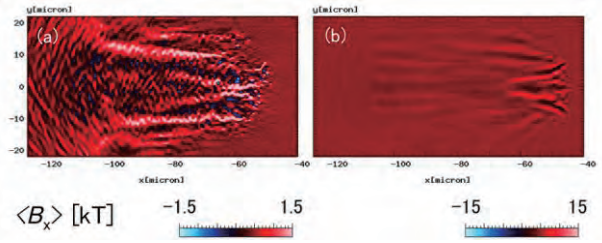

図５　外部磁場が(a)0.5 kT および(b)5 kT の場合の t = 500 fs におけるレーザー周期で時間平均した x 方向磁場の二次元プロファイル

3. 3 高エネルギー電子特性

x = 4 μm の位置（図３参照）を通過する高エネルギー電子を観測することで、強磁場下の超高強度レーザープラズマ相互作用によって生成される高エネルギー電子の特性をみた。図６に電子ビームフルーエンスの y 方向分布を示す。新たにシミュレーションを２つ行ったため、磁場なし、外部磁場 0.1、0.5、1.0、5.0 kT の５つのケースのデータを載せている。図よりわかるように、外部磁場が 0.1 kT の場合は、磁場なしの場合とほとんど結果が変わらないが、0.5 kT を超えてくると電子ビームが局在化してくる。1 kT の場合では、磁場による電子ビームのガイド効果が顕著に現れており、半値全幅で 23 μm とレーザーのスポット径とほぼ同じ値が得られている。さらに外部磁場が 5 kT の場合には、電子ビームフルーエンス分布にも構造がでており、この構造はフィラメント構造を反映していることがわかった。5 kT という強い外部磁場下では、超高強度レーザーによって生成される MeV 電子でも、そのラーモア半径が 1 μm と非常に小さくなるため、生成点における高エネルギー電子の分布がそのまま維持されて伝播していると考えられる。

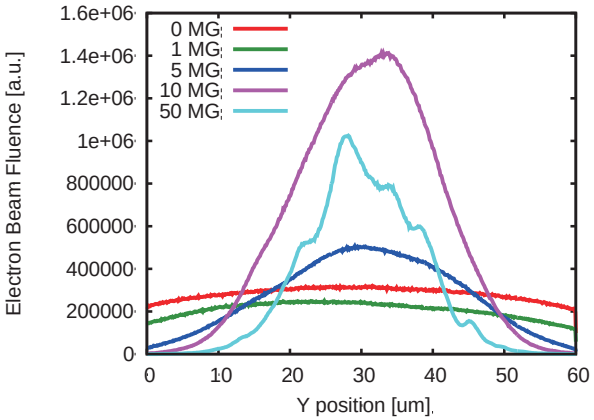

図６　ターゲット後方(x = 4 μm)で計測した電子ビームフルーエンスの外部磁場強度依存性

4. おわりに

本研究では、強磁場中の超高強度レーザープラズマ相互作用の電磁粒子シミュレーションを行い、外部磁場印加による、電磁場、電子密度における特徴的な構造形成および顕著な電子ビームガイド効果を明らかにした。最後に、若手・女性研究者支援萌芽枠採用により本研究を大きく進展させることができましたことに深く感謝申し上げます。

参考文献

(1) M. D. Perry and G. Morou, Science, **264**, 917, (1994).
(2) http://www.kansai.qst.go.jp/research-1.html
(3) H. Azechi and FIREX Project Team, J. Phys.: Conf. Ser., **717**, 012006 (2016).
(4) S. Fujioka et al., Sci. Rep., **3**, 1170 (2013).
(5) T. Johzaki et al., Plasma Phys. Control. Fusion, **59**, 014045, (2017).
(6) C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma physics via computer simulation*, CRC press (2004).