

Title	Research on Laser Plasma Acceleration by Particle-in-cell Simulation
Author(s)	周, 維民
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/134
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

氏名	周 維 民
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 22963 号
学位授与年月日	平成 21 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 工学研究科電気電子情報工学専攻
学位論文名	Research on Laser Plasma Acceleration by Particle-in-cell Simulation (粒子シミュレーションによるレーザープラズマ加速の研究)
論文審査委員	(主査) 教授 三間 罔興 (副査) 教授 田中 和夫 教授 飯田 敏行 教授 上田 良夫 教授 兒玉 了祐 教授 實野 孝久

論文内容の要旨

チャープパルス増幅法(CPA)の技術開発により、超高強度レーザーパルスは 10^{18} W/cm² を容易に超えるようになった。このような高強度レーザーはレーザーとプラズマの相互作用で発生する超高電場による、レーザープラズマ加速器を含むハイフィールド科学の新たな領域を開いた。このようなレーザープラズマ加速器により、高エネルギーの電子、プロトン、 γ 線のビームを発生することが可能になる。本論文は粒子(PIC)シミュレーションと理論的解析に基づいたレーザープラズマ加速とそれに関連するトピックについての研究を述べている。

第 1 章では、レーザー核融合の概念の発展からレーザープラズマ加速による、本論文の背景を紹介している。さらに、本文の目的とアウトラインが述べている。

第 2 章では、PIC 法の原理といくつかの特徴的なアルゴリズムから始めて、レーザープラズマ相互作用を記述する PIC プログラムの開発が議論されている。本文に説明されている研究で、我々の研究対象となっている空間サイズに対し、現実的なコンピューター時間で実行可能な一、二、三次元の完全電磁相対論的 PIC プログラムを開発した。すべての PIC コードは Fortran の言語でプログラムされており、メッセージ受付渡レインターフェース(MPI)メソッドを用いて並列化されている。

第 3 章では、プローブレーザー光の高次のラマン散乱側波帯を利用して、レーザーウェイクフィールドの非線形発展を測定する方法が提案されている。側波帯の振幅の解析解が提示されている。解析解の有効性を証明するために、1D PIC コードでウェイクフィールドによるプローブパルスの伝播をシミュレートした。解析解と PIC シミュレーションの結果がよく一致しているのが発見された。ほかの実験でも同じ結果が出ている。また、プローブレーザー光への、プラズマの密度、ポンプレーザーの強度、ウェイクフィールドの非線形性の影響が 1D PIC シミュレーションによる調べられている。この測定法がレーザーウェイクフィールドの計測に簡便に広く適用出来ることが示されている。

第 4 章では、2D PIC シミュレーションで高強度レーザーと円錐プラズマとの相互作用により、高温電子の加速が調べられている。斜め入射レーザーでプラズマの表面に電子束を生成する新しいメカニズムが提案されている。コーン先端における表面電子パンチの再加速効果を PIC シミュレーションによる調べた。コーンターゲットは高温電子とレーザーエネルギーを効果的にコーン先端にガイドし、レーザーによる加熱効率がより高くなることが実証された。二重壁のコーンターゲットにおいて高温電子が閉じ込められることをシミュレートした。このような二重壁のコーンターゲットは、高速点火において、単一壁のコーンターゲットよりさらによく高温電子を燃料カプセルに集中することが出来る。

第 5 章では、レーザーとコーンプラズマの相互作用に関して高温電子の素晴らしいアプリケーションの一つである陽子ビーム加速について報告する。加速された陽子ビームのエネルギーを増加するために、陽子コーティング層を持つコーンターゲットを用いたスキームが 2D PIC シミュレーションで研究されている。2D PIC シミュレーションの結果によると、コーン壁にそってレーザーと電子がガイドされる結果、高温電子のエネルギーがコーンターゲットでは増大することが示された。ターゲットリア面のシースフィールドが、高温電子の温度と密度の対数に比例するため増大する。シースフィールドにより加速される陽子ビームのエネルギーも増大する。単一エネルギーの陽子を生成するための要点が実験結果によって明らかになった。現在使用可能な PW レーザー装置により 200 MeV の単一エネルギー陽子ビームが発生できると予測される。

第 6 章では、レーザー強度を増加させる新しい方法として放物線プラズマ凹面を用いる高強度レーザーの集中が提案された。3D PIC シミュレーションを用いて集中の条件を調べた。様々な焦点距離とレーザー偏光について比較した。幾何学的焦点がレーザー強度を 2 桁高くすることが明らかになった。入射レーザーの反射とプラズマ凹面から生成する高次高調波が考慮されると、焦点のサイズがより小さくなり、高次高調波のレーザーパルス幅が圧縮されたため、集中されたレーザー強度を増加することが出来る。

第 7 章では、以上の研究の重要な結論をまとめた。

論文審査の結果の要旨

本論文は「Research on Laser Plasma Acceleration by Particle-in-cell Simulation」についてまとめたものである。短パルス超高強度レーザーとプラズマとの相互作用により非常に強い電磁場を発生することが可能であり、この電磁場を利用することで高勾配の粒子加速を実現し、コンパクトで高エネルギーの次世代粒子加速器の実現に高い期待が寄せられている。レーザー駆動プラズマ加速器は短パルスで微小な高輝度の電子ビームやイオンビームを発生すること可能であり、電子ビームを用いるコンパクトな X 線源や陽子ビームを用いる放射線治療等への応用が考えられている。本論文では、超高強度レーザーによる高エネルギー粒子加速の高度化を目指して、相対論レーザープラズマの計算機シミュレーションによる研究が報告されている。

第 2 章では、相対論的レーザープラズマ相互作用を研究するための粒子シミュレーションコードの開発について説明するとともに、レーザーと固体ターゲットとの相互作用を解析するための数値モデルが記述されている。開発された 2 次元粒子シミュレーションコードは、第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章の研究に用いられている。

第 3 章では、超高強度超短パルスレーザーでプラズマ中に励起される航跡場(電子プラズマ波)による電子加速の機構につき、加速過程を制御するために必要な加速場の診断手法が提案されている。すなわち、プローブレーザーと航跡場(電子プラズマ波)の電子密度揺動及びパンチした電子ビームによる密度揺動との相互作用を解析し、散乱されたプローブレーザーのスペクトルから、電子密度揺動の形状を決定して航跡波の Wave-breaking に至る過

程を診断するとともに、航跡波に捕捉され加速されている電子バンチの電子数と形状を決定する方法を提案している。

第4章では、レーザーで効率的に電子の加速を行うため、コーンと超高強度レーザーとの相互作用に着目し、コーン内面での電子加速をシミュレーションで解析している。その結果、コーン側壁において新しい加速機構が存在することを発見し、電子のエネルギースペクトルへの影響を明らかにしている。また、効率的に加速された電子を一点に集束するための方法として、ダブルコーンターゲットの有効性を提案している。

第5章では、陽子加速におけるコーン形状ターゲットの有効性をシミュレーションにより明らかにし、陽子のエネルギーがコーンを用いない場合に比べ3倍になることを示している。レーザー駆動陽子ビームによるガン治療には200 MeVの陽子ビームを100TW程度のレーザーで発生することが求められている。200 MeVの陽子を実現するためのコーンターゲットとレーザーの条件を明らかにしている。

第6章では、比較的小型のレーザーで超高強度レーザー照射を可能にするため、プラズマミラーを用いて100倍以上のピーク強度を実現する可能性を計算機シミュレーションにより明らかにしている。シミュレーションではプラズマミラーでは高調波の発生が重要であり、その結果レーザービームのスポットサイズが半径0.1ミクロン以下になることが明らかにされている。このようなプラズマミラーによる高強度レーザー照射は、レーザー粒子加速に大変重要である。

以上のように、本論文はレーザープラズマ粒子加速の機構の新しい診断法を提案するとともに、超高強度レーザーを用いた陽子ビームの高効率発生ならびに高エネルギー化の指針を示している。さらに、プラズマミラーにより超高強度レーザー強度照射を実現し、より高エネルギーの粒子加速器の実現可能性を明らかにしている。これらの知見は当該分野の発展に寄与するところが大きく、よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。