

Title	Generation mechanism of relativistic electron beams by high-intensity-laser-plasma interactions
Author(s)	小島, 完興
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/61503
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (小島 完興)

論文題名

Generation mechanism of relativistic electron beams by high-intensity-laser-plasma interactions
 高強度レーザープラズマ相互作用による相対論的電子ビームの生成機構の解明

論文内容の要旨

高速点火方式の慣性閉じ込めレーザー核融合では、予め圧縮した燃料球に加熱レーザーを照射し、レーザープラズマ相互作用によって加速した相対論的エネルギーを有する電子（以下、高速電子）で高密度燃料を加熱する。高速電子の飛程と燃料の面密度が等しいとき加熱効率率は最大となる。そのため適切なレーザー集光強度を決定するために高速電子の平均エネルギーとレーザー集光強度の依存性が研究され、Ponderomotiveスケーリング則等が導出された。

近年の大規模計算の結果、上記のスケーリング則では考慮されていない加熱レーザーのパルス幅に対する高速電子の平均エネルギーの依存性が示された。電子の平均エネルギーとパルス幅の依存性は、高速点火レーザー核融合に適する加熱レーザーのパラメーターの決定に影響する。本研究はこの電子の平均エネルギーのパルス幅の依存性を実験的に初めて調べたものである。本研究の遂行にあたり、2つの研究開発が必要であった。

加熱レーザーの特性評価には、主パルスの強度とフットパルス、ペDESTAL及びプリパルスの強度の比で定義される「パルスコントラスト比」が用いられている。10⁻⁹程度のパルスコントラスト比のレーザーでは、プリプラズマの空間スケール長が、主パルスが生成するプラズマのスケール長よりも長く、主パルスのパルス幅が電子加速に与える影響のみを抽出することが出来ないため、プラズマミラーによるパルスコントラストの改善を行った。プラズマミラーの表面でのレーザーエネルギー面密度を最適化し、反射率・平面性及びパルスコントラストの改善率が高いプラズマミラーを実現した。プラズマミラーの導入により、メインパルスの1.3 ns前において10⁻¹¹の高いコントラスト比を実現し、望まないプリプラズマの抑制に成功した。

また、従来研究では、高速電子のエネルギー分布はプラズマから真空中に飛び出した電子から観測していた。この方法ではプラズマ周囲の電磁場に補足される低エネルギーの電子を検出出来なかった。本研究では電子をプラズマ中で制動放射X線に変換し、制動放射X線スペクトルから電子のエネルギー分布を再構成する手法を確立した。制動放射X線スペクトル分光のために、コンプトン硬X線分光器を開発し、従来の制動放射X線分光器よりも高いスペクトル分解能を得た。

プラズマミラーによる高コントラスト光とX線分光による電子エネルギー分析法を用いることで、1-4 psの範囲で、加熱レーザーのパルス幅が電子加速に与える影響を実験的に観測することに成功し、実験結果を2次元Particle-in-cellシミュレーションにより解析した。長パルス化による電子の平均エネルギー上昇は、主パルス自身が生成する長スケールのプラズマのみならず、プラズマ中で自己生成する準静的電場・磁場が強く寄与することを明らかにした。準静的電場が存在すると電子はレーザー電場による加速をより長時間受け、磁場は一度加速された電子をもう一度加速場に戻す作用がある。レーザーパルス幅と準静的電場と磁場の成長の時間スケールの関係について考察を行い、高速点火レーザー核融合に最適なレーザーパラメーターを決定するための指針を得た。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (小 島 完 興)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	藤岡 慎介
	副 査	教授	下田 正
	副 査	教授	嚙地 宏
	副 査	教授	中井 光男
	副 査	教授	千徳 靖彦
<p>高強度大出力レーザーを用いた慣性閉じ込め核融合の高速点火方式では、二段階で核融合点火を行う。第一段階では、ナノ秒パルスのTWレーザーを核融合燃料球に照射し高密度に圧縮する。第二段階では、慣性によって核融合燃料が高密度を保持している数十ピコ秒の間に、ピコ秒パルスのPWレーザーで核融合燃料を点火温度まで追加加熱する。この追加加熱の過程では、PWレーザーとプラズマの相互作用によって、核融合燃料近傍のプラズマ中に存在する電子群が光速近くにまで加速される。この相対論的電子ビームが、PWレーザーのエネルギーを受け取り、核融合燃料にエネルギーを付与することで、核融合燃料は加熱される。相対論的電子ビームの飛程が、核融合燃料の面密度と同程度又はそれよりも小さい場合に、高効率な加熱が実現する。相対論的電子ビームの飛程は、そのエネルギー分布の勾配温度(=平均エネルギー)にほぼ比例する。</p> <p>相対論的電子ビームの平均エネルギーのレーザー集光強度への依存性のみを考慮した Ponderomotive スケーリング則が、広く受け入れられ、高速点火方式のPWレーザーの最適化に用いられてきた。ところが、相対論的電子ビームの平均エネルギーは、パルス幅にも依存するという新しい予測が、近年の大規模シミュレーションによって明らかになった。本研究の目的は、高速点火方式における追加加熱の効率化のために、相対論的電子ビームの平均エネルギーの、集光強度依存性とパルス幅への依存性を実験的に明らかにすることである。本研究の遂行にあたり、プラズマミラーとコンプトン型硬X線分光器を開発している。</p> <p>相対論的電子ビームの平均エネルギーとPWレーザーの集光強度及びパルス幅の依存性を明らかにするためには、PWレーザーのメインパルスの強度とフットパルス、ペDESTAL及びプリパルスの強度の比で定義される「パルスコントラスト比」を10^{10}以下に抑えなくてはならない。本研究では、kJ級のPWレーザーに世界で初めてプラズマミラーを導入し、10^{11}という高いコントラスト比を実現した。</p> <p>合わせて、新しい相対論的電子ビームの計測法も開発した。相対論的電子ビームをプラズマ中で制動放射X線に変換し、制動放射X線スペクトルから電子のエネルギー分布を再構成する手法を確立した。制動放射X線のスペクトルを計測するために、コンプトン散乱を利用した新しいコンプトン型硬X線分光器を開発し、相対論的電子ビームのエネルギー分布を高精度に計測することに成功した。</p> <p>プラズマミラーの導入による高コントラストなPWレーザーパルスと相対論的電子ビームのエネルギー分布計測を用い、同じ集光強度であってもPWレーザーのパルス幅を1 psから4 psに伸ばすことで、平均エネルギーの増加が起こることを実験で明らかにした。実験結果を2次元 Particle-in-cell シミュレーションと比較し、プラズマ中で自己生成する準静的電場及び磁場が相対論的電子ビームの追加加速を起こすことを明らかにした。レーザープラズマ相互作用領域に存在する準静的電場によって、一部の電子はレーザー電場によって常に加速を受ける位相に定在することが可能になる。自己生成磁場は一度加速された電子をもう一度、レーザープラズマ相互作用領域に戻す効果がある。レーザーパルス幅と準静的電場及び磁場の成長率の関係について理論モデルを構築し、高速点火レーザー核融合に最適なレーザーパラメーターを決定するための指針を得た。</p> <p>プラズマミラーとコンプトン型硬X線分光器という新しい実験技術を用いて、マルチピコ秒の高強度レーザーとプラズマの相互作用という非定常で非線形なプラズマ物理に、新しい実験的知見を加えた優れた研究成果であり、本論文は博士(理学)の学位論文として十分価値あるものと認める。</p>			