

平成 29 年 6 月 30 日現在

機関番号：33811

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400537

研究課題名(和文) 超高強度レーザーの偏光制御による高速電子のコヒーレンス向上とプラズマ加熱への展開

研究課題名(英文) Improvement of fast electron coherence by tuning polarization of ultra-intense laser

研究代表者

森 芳孝 (MORI, Yoshitaka)

光産業創成大学院大学・その他の研究科・准教授

研究者番号：60440616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー技術の進展により、日本の総電力パワー(テラワット)に相当するパワーを瞬間的かつ局所的につき込むことが可能となった。結果、物質を構成する電子が瞬時に光速に加速され、究極のエネルギー源とされる核融合プラズマを加熱することが期待されている。しかし、電子の運動がはやすぎるため、プラズマが加熱されない状況が続いていた。今回、レーザーの電場の向き(偏光)を、従来の直線偏光から円偏光とすることで、高速電子のコヒーレンス向上による低温度化とプラズマ加熱への展開を試みた。結果、円偏光の場合、エネルギー0.3 MeV以下の低エネルギー成分が増大しており、プラズマを効率よく加熱できる可能性が見出された。

研究成果の概要(英文)：We conducted experiments by tuning polarization of ultra-intense laser pulses from linear polarization to circular polarization and then irradiating into a solid target. As the results, for the circular polarization, we found that energy population below 0.3 MeV was increased for circular polarization. This results indicate a possibility of efficient plasma heating in comparison with usual linear polarization.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：超高強度レーザー 偏光制御 高速電子 高速点火

1. 研究開始当初の背景

2001年に兒玉らにより発明されたレーザーガイドリングコーン付きシェルを標的として、キロジュールレーザーを用いた高速点火方式レーザー核融合統合実験が、日本および米国で続けられている(疇地他 NucFusion2013、Theobald 他PoP2011)。これはコーン先端から発生する高速電子で低温高密度爆縮コアを加熱する方式であり、加熱効率向上には、(1) 生成電子の発散角拡がりや(2) コーン内に形成されるプリプラズマによる高速電子の温度上昇の抑制が指摘されている。(1) について、外部生成磁場による高速電子発散角の抑制が試みられた(藤岡他SciRep2013)。(2) について、プリプラズマをなくすためにガイドリングコーンの形状改良及び加熱レーザーフロントエンドへのプリパルス除去機構導入が実施された(白神他PPCF2011)。しかし、統合実験で得られた高速電子温度は、平板ターゲットを用いた実験スケールリング(谷本他PoP2009)の予測より5倍以上高くなっており、結果、高速電子の飛程が長くなり爆縮コアへのエネルギー付与が低い状態が続いている。

高速電子の温度上昇の原因は、相対論的強度のレーザー電場とレーザー磁場で駆動されるクイバー($\mathbf{v} \times \mathbf{B}$)運動にあり、現状の直線偏光レーザーを用いる限り、レーザーからプラズマへの吸収率向上のためレーザー強度をあげると、高速電子の温度も比例して上昇し飛程は長くなる。一方、円偏光レーザーを用いると、クイバー運動をおさえることができ、高速電子の温度を下げるができる。例えば、プラズマ粒子加速の分野では、独マックスプランクのグループが、加速イオンの高エネルギー化と変換効率向上を目指し、偏光変換機構をレーザーに導入し、高速電子のクイバー

運動を抑えることで光子圧力によるカーボンイオンの加速を実証した(Henig 他PRL2009)。イオン加速に対する偏光依存性は、当初、原研の福見らにより実験検証されたが、電子温度の低温度化の検証はなされていない(福見他PoP2005)。最近、米国ロスアラモス、独マックスプランクのグループにより集光強度 $5 \sim 1020 \text{ W/cm}^2$ での実験がなされているが、加速イオンエネルギーの単色化に注力しており、イオン加速の駆動力である高速電子の振る舞いについては言及されていない(Jung 他NJP2013)

2. 研究の目的

超高強度レーザー電磁場を円偏光にすることでクイバー運動を抑制し、レーザー照射により発生する高速電子のコヒーレンス向上(低温度化)を試みる。円偏光/直線偏光レーザーを固体に照射した際の高速電子スペクトルを計測し、レーザー強度($10^{16} \sim 10^{19} \text{ W/cm}^2$: $a_0 = 0.1 \sim 2.5$)での円偏光電磁場に対する新たな高速電子温度の実験スケールリングを見出す。レーザー偏光を調整することで、プリプラズマがある状態でも高速電子温度を抑制できる方法を探り、高速電子の飛程を短くすることで、プラズマ加熱の高効率化につなげる。

3. 研究の方法

円偏光超高強度レーザーを固体ターゲットに照射し、高速電子スペクトルを計測する。レーザー強度($10^{16} \sim 10^{19} \text{ W/cm}^2$: $a_0 = 0.1 \sim 2.5$)における高速電子温度の実験スケールリングを得る。

1. 偏光可変素子の導入

3 インチ1/4 波長板(特注)を真空パルス圧縮器に導入し、直線偏光を円偏光に変換した。偏光調整には、パルスエネルギーメータ(現有)を用いた。

2. インライン電子スペクトロメータの導入

現有のインライン電子スペクトロメータ（レンジ10 ～ 50MeV）の運用をもとに、低エネルギー電子スペクトロメータ（レンジ0.5 ～ 5 MeV）を新たに導入した。遮光つき磁気ヨーク（磁束密度0.4 T）と蛍光板検出面-CCD カメラ（16bit 冷却CCD：新規）間の光学システムを設計し導入を試みた。電子数の絶対値校正には、イメージングプレートを用いた。

3. 固体ターゲットへのレーザー照射実験

現有のディスク回転機構（連続100 shot 可能）に、薄膜ターゲット（厚み12 μm アルミ or ポリスチレン）を取り付け、固体薄膜における電子スペクトルを取得する。レーザーエネルギーを変えることで、レーザー強度 ($> 2 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2 : a_0 > 1$) に対する高速電子の温度スケールリングを求める。

4. 研究成果

4-1. 偏光制御

波長板の回転角に対する偏光の変化振る舞いをみるために、パルス圧縮器の前に波長板を設置し、波長板の回転角に対するパルス圧縮器通過後のエネルギーを計測した。波長板の回転角に対するパルス圧縮器通過後のエネルギーの計測結果を図1に示す。

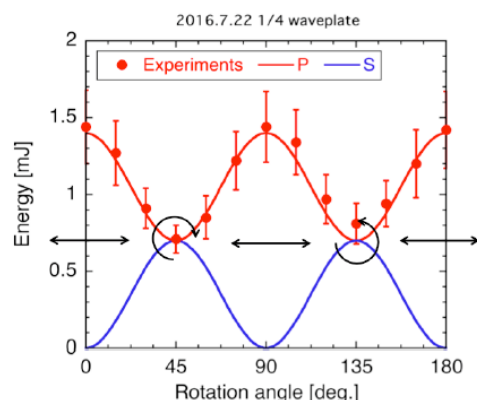


図1: $\lambda/4$ 波長板による偏光制御

P偏光の回折光エネルギーが減少しているときは、スペキュラー方向の光量が増加し

ていることをフォスファーで確認した。これは、波長板により、S偏光成分が生じるとP偏光成分が減少し、S偏光成分がスペキュラー方向へ反射されたためであると考えられる。回転角に対するふるまいは、サインカーブで近似でき、この近似は、 $1/4$ 波長板の特性と一致する。

4-3. 固体ターゲットへのレーザー照射実験

照射ターゲットとして、厚み100 μm 、直径100 mmのSUS 板円盤ターゲットを採用した。SUS 板ターゲットは、回転ディスクターゲット駆動装置に装着され、20 秒/回転で回転し、レーザー照射方向の位置変動は、100 μm 以内であったレーザーを回転SUS 板ターゲットへ照射したときの様子を図2に示す。

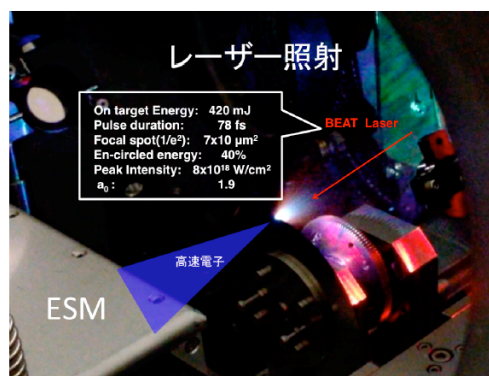


図2: レーザーを回転SUS 板ターゲットへ照射したときの様子

レーザーは繰り返し0.5 Hzで運転し、ショットは一つの実験条件あたり、100 ショット実施した。

レーザーをターゲットへ照射した際に発生するガンマ線を、照射容器を取り囲む3台のプラスチックシンチレータで計測した。プラスチックシンチレータ計測器は、レーザー照射方向に対して、0, 90, 180 度に設置した。クシンチレーターの前面は、厚み5 cm の鉛で遮蔽している。 $1/4$ 波長板は、パルス圧縮後に挿入した。 $1/4$ 波長板の有無によるガンマ線発生確率の違いをみた。図3に結果を示す。

プラスチックシンチレータの結果
直線、円の偏光の違いによらず、波長板を導入するとガンマ線の発生割合が低減した。

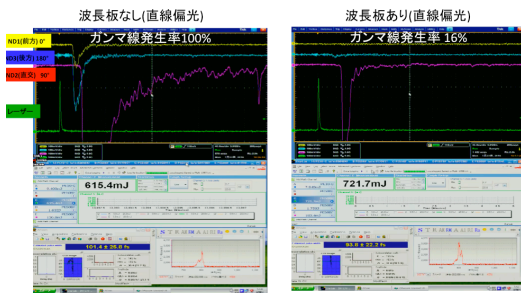


図3: 偏光板の有無によるガンマ線発生の違い

波長板を導入する前は、100%であったガンマ線発生確率が、波長板導入により、16%に低減していた。これは、波長板導入により、B積分値が増大し、波面悪化を引き起こし、集光スポットが拡大したことが原因のひとつに考えられる。実際、透過光学素子の位相変化を見積もった結果、位相変化が0.16 rad から 2.7 radに増大していた。

1/4 波長板の回転角度を変えたときの、レーザー照射方向(0度)と直角方向(90度)におけるガンマ線強度の発生確率を図4に示す。

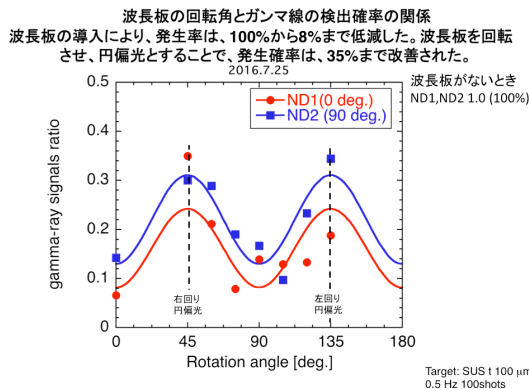


図4: 偏光板回転角度に対するガンマ線発生頻度の変化

波長板を回転させ、円偏光とすることで、発生確率は、35%まで改善した。

次に、高速電子エネルギースペクトルを計測した。計測セットアップを図5に示す。

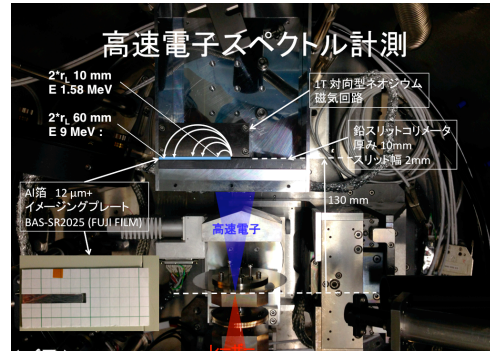


図5: 高速電子エネルギー計測

高速電子エネルギースペクトルメータは、今回新たに新設した。磁束密度1Tの永久磁石を用いることで、エネルギー1.6 MeVから9 MeVの電子を180度回転させてエネルギー分別を行うものである。当初は、蛍光板を用いる方式を想定していたが、高速電子の信号量が微弱であったため、イメージングプレートによる計測を行った。

電子スペクトルの比較を行った結果、波長板導入前のPSLのslopeは、0.92 MeVであった。波長板を導入すると、slopeは0.25 MeV(直線偏光)、0.26 MeV(円偏光)に低下し、偏光の依存度は小さかった。図6に結果を示す。

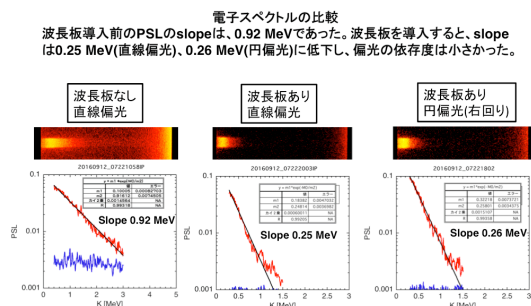
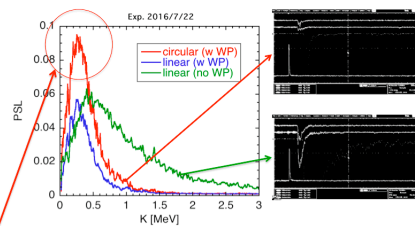


図6: 電子スペクトルの結果

ガンマ線の信号と電子スペクトロメータの比較波長板導入でシンチレータのガンマ線が低減したのは、発生高速電子の高エネルギー成分が減少したためと考えられる。波長板の導入により、集光強度が低下したことを示唆している。図7に結果を示す

ガンマ線の信号と電子スペクトロメータの比較
波長板導入でシンチレータのガンマ線が低減したのは、発生高速電子の高エネルギー成分が減少したためと考えられる。波長板の導入により、集光強度が低下したことを示唆している。



一方で、円偏光とすることで、低エネルギーの電子成分が増えたことは、プラズマを効率よく加熱できることを示唆している。

図7: ガンマ線の信号と電子スペクトロメータの比較

得られた結論は以下のとおりである。

- 超高強度レーザー電磁場を円偏光にすることで、クイバー運動を制御し、レーザー照射により発生する高速電子の低温度化を試みる実験を行った。
- 1/4 波長板をパルス圧縮後のビームラインへ導入し、超短パルスレーザーの偏光を制御し、金属ターゲット表面へレーザーを集光照射したときに発生する g 線および高速電子スペクトルの計測をおこなった。
- 波長板の導入により、発生率は、100%から 8%まで低減した。波長板を回転させ、円偏光とすることで、発生確率は、35%まで改善した。
- 発生確率が低下した原因として、透過光学素子により、位相変化が 0.16 rad から 2.7 rad に増大したため、波面が歪み、ビーム集光径が大きくなり、照射強度が低下した可能性が考えられる。
- 波長板の導入により、高速電子信号をあらわす PSL の slope は、0.9 MeV から 0.25 MeV に低下し、slope については、偏光の違いは現れていない。
- 一方、円偏光では、低エネルギー(0.3 MeV 付近)の高速電子成分が増大しており、これは、波長板導入前と比べても顕著であった。
- 円偏光により、低エネルギーの電子成分が増えた結果は、プラズマを効率よく加熱できることを示唆している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 芳孝 (MORI Yoshitaka)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・准教授

研究者番号：60440616

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

砂原 淳 (SUNAHARA Atsushi)

公益財団法人レーザー技術総合研究所・理論・シミュレーションチーム・研究員

(現 パデュー大)

研究者番号：00370213

(4) 研究協力者

()