

様々な材料を用いたイオン加速機構の解明・制御の為の高速電子計測

Measurements of fast electrons created by an ultra-intense laser light from various target materials for the control of laser proton acceleration.

田中 和夫¹⁾ 羽原 英明¹⁾ 三島 陽介¹⁾ 岩脇 智行¹⁾ 河野 拓也¹⁾ 森田 澄¹⁾
 森岡 朋也¹⁾ 木久山 健四郎¹⁾ 近藤 公伯²⁾ 西内 満美子²⁾ 余語 覚文²⁾
 Alexander Pirozhkov²⁾ 福田 祐仁²⁾ 小倉 浩一²⁾ 谷本 壮²⁾

Kazuo A. TANAKA Hideaki HABARA Yosuke MISHIMA Tomoyuki IWAWAKI Takuya KONO Kiyoshi MORITA
 Tomoya MORIOKA Kenshiro KIKUYAMA Kiminori KONDO Mamiko NISHIUCHI Akifumi YOGO Alexander
 PIROZHKOV Yuji FUKUDA Koichi OGURA Tuyoshi TANIMOTO

¹⁾大阪大学 ²⁾原子力機構

(概要)

本研究は(1)超高強度レーザーと固体物質との相互作用により生成する高エネルギーイオンのエネルギー及び空間放出分布を制御するため、様々な金属物質を用いてレーザー駆動高速電子のエネルギー制御し、また発生させたプロトンにより材料を照射しその損傷しきい値などを求めることを目的としている。J-KARENを用いたレーザー実験を行い、高速電子の平均エネルギーがターゲット材質のZ番号に従って低下し、その低下率が電離度と密接な関係が有ることが分かった。また1MeV程度プロトンの高粒子束による炉材料候補材の損傷の様子を世界で初めて観測することに成功した。

キーワード：

相対論的レーザー相互作用、高速点火、炉設計

1. 目的

本研究の目的は(1)超高強度レーザーと固体物質との相互作用により生成する高エネルギーイオンのエネルギー及び空間放出分布を制御するため、様々な金属物質を用いてレーザー駆動高速電子のエネルギースペクトルを変化させ、そのイオン加速への影響を調べることである。J-KARENレーザーのようにペDESTALやプレパルスに対するメインパルスのコントラストが良いレーザーでは、レーザーは固体密度プラズマと相互作用する。そのため、材質による違いが現れることが期待されている。さらにターゲット裏面で加速されるイオンは、基本的にどの金属を用いても表面に多量に吸着されているプロトンであることが知られているが、イオンを加速する電場が高速電子の緒特性で決まるため、ターゲット材質により異なることが予測されている。本研究ではイオン、電子及びそれらとプラズマとの相互作用で生成するX線を計測することでイオン加速のメカニズムを求め、制御することを目的とする。第二の目的として、(2)発生させたプロトンにより材料を照射しその損傷しきい値などを求めることである。

2. 方法

(1)アルミニウム、銅、金などの金属薄膜にJ-KARENレーザーをタイトフォーカスで照射し、生成する高速電子、高エネルギーイオン、X線をそれぞれ電子スペクトロメータ、トムソンパラボライオン分光器やシングルフォトンX線カウンタ法で計測を行う。高速電子のエネルギースペクトル等を変化させることで加速されるイオンのエネルギーなどを制御させることを目的としているため、高速電子とイオンの空間・エネルギー分布の相関を詳細に取得し、検討を行う。ターゲット厚はターゲット内部での電子散乱の影響を無視できる数ミクロン程度にする。またイオンの加速機構自体がレーザー照射強度によって変化する可能性があるため、レーザーエネルギー

を変化させた強度依存性に関しても実験を行う。(2) アルミ薄膜から発生させたプロトン束を 1 mm 離れたマイラシートに照射し、その損傷程度を調べる実験をおこなう。

3. 研究成果

(1) 金、銅、アルミニウム薄膜に対しレーザー強度 $1.0\text{--}0.5 \times 10^{20} \text{W/cm}^2$ の照射強度でレーザーを照射したところ、高速電子の平均エネルギーは、原子の電子番号、つまり原子当たりの電子数が多いほど低下することが分かった。この傾向は粒子シミュレーションでも見受けられていたが、その原料率はシミュレーションによる減少率 $Z^{-1/2}$ よりも緩やかであった。また生成された高速電子の数を制動放射 X 線スペクトルより求めたところ、逆に高 Z 物質の方が生成される電子数が多いことが分かり、高 Z 物質は低エネルギー、高密度、低 Z 物質は高エネルギー、低密度の高速電子生成というシミュレーションの傾向を再現した。

また高エネルギーイオンに関しては、強度によって顕著な違いが見られた。 $1.0\text{--}0.5 \times 10^{20} \text{W/cm}^2$ の照射強度では高エネルギーイオンのエネルギー分布はほぼマックスウエル分布で、すべてのターゲットにおいて 10 MeV のカットオフを持っていた。またそれより一桁低い照射強度においては、材質による差は認められず、ターゲット厚さとともに単調に減少した。

(2) マイラ箔には、レーザーエネルギー 2 J の際、プロトンにより損傷が認められた。レーザーエネルギー 18 J の際には、マイラ箔は、プロトン照射により貫通穴を形成した。

4. 結論・考察

(1) 高速電子の平均エネルギーが傾向としては実験とシミュレーションで同じだが、減少率が異なる問題に関しては、高強度レーザーによるイオン化の影響であることが考えられる。イオン化過程を模擬できるシミュレーション及び Field Barrier Suppression イオン過程による解析を行ったところ、どちらも J-KAREN レーザー程度のレーザー強度、パルス幅ではアルミはほぼ完全電離だが、金ではおよそ 20 前後の電離度となることが分かった。この電離度の差からもめられる減少度が実験値と一致し、高速電子の平均エネルギーは電離度が大きく関与することが新たな知見として求められた。このことは数 10 fs 程度のレーザーでは材料依存性は弱いことを意味し、レーザー核融合高速点火方式で使用されるような数 ps 程度のレーザーであればその差が顕著になることが予測された。

またイオン加速においては、以前は電子温度のみがイオンの最大加速エネルギーを決定するパラメータだと考えられてきたが、基礎方程式を見直すと、そのパラメータは高速電子の数と平均エネルギーの積であることが分かった。実験結果は制動放射から求められた電子数と平均エネルギーの積はターゲットによらずほぼ一定であることから、イオンの最大エネルギーが一定であることと一致する。このことは、イオン加速が数とエネルギーの積であることを確認するとともに、電子の直接計測と共にターゲット材質により高速電子の平均エネルギーを制御出来ることを間接的に証明した。

(2) 得られたデータは、1 MeV 近辺のプロトンによる材料損傷のデータであり、極めて貴重である。今後、これらのデータをモンテカルロコードによる計算結果と比較することで材料損傷の研究を大幅に進展させることができる。

5. 引用(参照)文献等

- Y. Sentoku et al., presentation in 9th Fast Ignition Workshop, Boston (2006).
 S. Gitomer *et al.*, Phys. Fluids **29**, 2679 (1986).
 Y. Sentoku *et al.*, Appl. Phys. B, **74**, 207-215 (2002)
 A. J. Mackinnon *et al.*, Am. Phys. Soc. **88**, 21 (2002)
 Y. Sentoku *et al.*, Phys. Plasmas, **10**, 5 (2002).
 Y. Sentoku et al., presentation in OFES/NNSA Joint Program in High Energy Density Laboratory Plasmas, Washington DC (2006).