

カーボンナノチューブターゲットによる レーザー駆動単色 X 線発生の高効率化

Efficient x-ray generation with Carbon nano-tube target irradiated with
laser

藤岡慎介¹⁾、Zhang, Zhe¹⁾、Lin An、西村博明¹⁾、錦野将元²⁾、河内哲哉²⁾、
匂坂明人²⁾、織茂 聡²⁾、小倉浩一²⁾、Pirozhkov, Alexander²⁾、余語覚文²⁾、
岡野泰彬³⁾、大島慎介⁴⁾、近藤公伯²⁾

Shinsuke FUJIOKA, Zhe ZHANG, An LIN, Hiroaki NISHIMURA, Masaharu NISHIKINO, Tetsuya KAWACHI,
Akito SAGISAKA, Satoru ORIMO, Koichi OGURA, Alexander PIROZHKOV, Akifumi YOGO, Yasuaki OKANO,
Shinsuke OKANO, Kiminori OKANO

¹⁾大阪大学、²⁾原子力機構、³⁾分子科学研究所、⁴⁾京都大学

高出力レーザー生成プラズマからの単色 X 線高効率発生を目指し、ターゲット表面にカーボンナノチューブコートをしたターゲットなどを、高コントラスト J-KAREN レーザーにより照射した。その結果、世界最高レベルの X 線変換効率を達成する条件を明らかにした。

キーワード : レーザー生成プラズマ、単色 X 線放射、変換効率、レーザープラズマ相互作用

1. 目的

超高強度レーザープラズマ放射単色 X 線は、超短パルス、準単色、高繰り返し、高輝度等の特徴をもち、様々な分野への応用が展開されている。このため、高効率でクリーンな X 線発生が望まれている。これまでの研究で、ターゲット表面を金ブラック、格子溝、ピロードコートなどの表面微細化によりレーザーとターゲットの相互作用実効面積を拡大し、発生効率の飛躍的向上が図られてきた。中でも、レーザー照射強度 10^{16} W/cm² 程度の実験においては、カーボンナノチューブ (CNT) ターゲットをターゲット表面コート材として用いることにより、無コートの場合と比較して 1 桁高い X 線生成が可能であることが報告されている[1]。高エネルギーの X 線を発生させるためには、より照射強度の高い領域における X 線の発生を調べる必要があるが、通常、高強度レーザーではレーザー装置から漏れるプレパルスによって表面微細構造が先行破壊されるため、その効果が期待出来ないことから、研究の進展が遅れていた。

このような背景から、本研究では、コントラスト比が格段に優れた J-KAREN レーザーを用いることにより、プレパルス効果の抑制を狙い、これまでに実現されていない超高強度領域でのレーザープラズマ X 線発生の効率的発生の条件を明らかにするとともに、レーザープラズマ相互作用の物理に関する基礎的知見を得ることを目的として実施した。

2. 方法

レーザーの振動電界成分が CNT 表面と垂直となるため、ターゲットとの相互作用面が飛躍的に増す。更に、CNT の表面に発生したプラズマシースに沿って高速電子が流れるため、基板へ向かう電子流を誘導することができる。この高速電子流が起こす基板金属原子の内殻電離によって、効率良い X 線発生が期待できる。このような仮説をもとに、その実証を目指し、以下の点に注目した実験を行った：

1. 駆動レーザーのプレパルス効果の検証：プレパルスコントラストを制御し、レーザー光吸収や X 線発生に対する依存性を調べた。
2. 変換効率の CNT 構造・照射条件への依存性：CNT ターゲットの構造 (CNT 径の太さ、間隔密度など) 等をパラメータとして、主として CNT の初期伝導度や膨張によるプラズマ構造の変化が X 線発生に与える影響を定量評価した。また、CNT に対するレーザー焦点位置、照射角度を意図的に変え、その高速電子流の生成効率、制御効果に対する影響を調べた。また、比較のため、CNT コートを施さないターゲット、あるいは CNT コートに相当する密度厚さ積をもったパリレンコートをしたターゲットなども照射した。

実験には、量子科学研究施設 J-KAREN(高強度場生成 T3) レーザー装置ならびにプラズマ発生チェンバーを使用した。主力診断装置となる単光子検出 CCD 分光器ならびにラウエ型分光器、ならびにターゲット監視カメラ1チャンネルは阪大レーザー研より持ち込んでチェンバーに装着した。また、ターゲット設定装置、X線ピンホールカメラ、鏡面反射成分のエネルギーやスペクトル計測に関しては、原子力機構の既存装置を使用した。

ターゲットとして Cu ($K\alpha$: 8.047 keV), Mo ($K\alpha$: 17.479 keV), Ag ($K\alpha$: 22.162 keV)の三種類の金属基板を用いた CNT コートターゲットならびにコート無 Cu, Ag, Mo の金属基板ターゲットを主たるターゲットとして用いた。これらの CNT コートの特徴的パラメータは、CNT 径: 30 nm~50 nm、CNT 長さ: $7\ \mu\text{m} \pm 2\ \mu\text{m}$ 、CNT 密度: $10^9\ \text{CNTs}/\text{cm}^2$ ならびに $10^{10}\ \text{CNTs}/\text{cm}^2$ を採用した。加えて、CNT 径 120nm 程度のターゲットと CNT 密度の異なるターゲットを比較用に照射した。また、CNT とほぼ同等のカーボン原子数を含む CH (パリレン) コートを施した Mo 基板も使用し、コートの微細構造の有無の影響を調べた。

ターゲットを回転させることにより、ターゲット垂直からの角度 22.5 度ならびに 45 度における同様な計測を実施し、照射角度依存性も調べた。

レーザー照射強度は、レーザーエネルギーの調整を行うとともに、集光鏡位置を固定したままターゲット位置を変化させ、ターゲット上でのスポット径を変化させる方法を採用した。また、J-KAREN レーザーのパルスコントラスト比は、 10^{-11} , 10^{-10} , 10^{-7} の 3 通りで比較した。

3. 研究成果

CNT コートを施さない Cu ターゲットから得た代表的スペクトルを図 1 に示す。Cu ターゲットからの X 線は、レーザー照射により発生した高速電子が Cu の K 殻電子を励起、電離し、その空殻に L 軌道からの電子が遷移する際放出された $K\alpha$ 線 (~8keV) である。低エネルギー側の信号は制動放射成分ではなく、単光子検出 CCD を構成する複数の画素に電子雲が分かれて出力された、いわゆるスプリット成分に由来する信号である。

X 線変換効率は、レーザー照射強度やパルスコントラスト比、入射角度により大きく変化した。CNT ターゲットの有無でも変化が見られたが、Mo ターゲットに限れば、変換効率の最大値は CNT コートの有無に関係なく、約 5×10^{-5} /sr の変換効率を得た。この値は、理論的に予測される変換効率[2]にかなり近い値となっており、従来の結果より 2 桁近い高い変換効率を達成している。

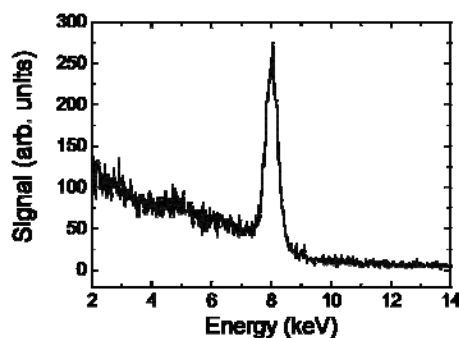


図1 コート無し Cu ターゲットからの $K\alpha$ 線スペクトル

4. 結論・考察

今回使用したターゲットは、レーザー照射強度から推定される高速電子の飛程より厚いターゲットを意図的に選択し、発生した高速電子がターゲット裏面に形成されたシースポテンシャルにより戻され、照射面に戻るような「リフラクション(ターゲット表裏の往復運動)」を起こさないようにしている。このため、ターゲット内部に侵入した高速電子により発生した X 線のうち、ターゲット表面を通過した成分が検出されている。ちなみにこの厚さは $\text{Cu}K\alpha$ 線で、 $22\ \mu\text{m}$ 程度であり、400keV 電子のストッピングパワーレンジに相当する。このような状況下では、 $K\alpha$ 線の変換効率はレーザー光の吸収率、すなわち、投入されたレーザー光が

どのように吸収され、どのような速度分布の高速電子に変換されか、というレーザープラズマ相互作用の物理をそのまま反映することになる。言い換えれば、発生 X 線をプローブとして、エネルギー輸送の診断を行っていることに相当する。

今回の実験で使用した J-KAREN レーザーでは、従来のレーザー装置よりも格段に優れたパルスコントラスト比をもっているため、従来のレーザー装置で得られた数 μm のスケール長をもったプレプラズマより一桁短いスケール長のプレプラズマ、すなわち、レーザー波長よりも短いスケール長となっていると予想さ

れる。このような状況下では、主となる吸収機構が共鳴吸収から真空加熱（疑似共鳴吸収とも呼ばれる）に置き換えられる。以上のような考察から、今回得られた実験は、2つの意義がある。一つはレーザー駆動 X 線変換におけるデータベースとしての役割であり、もう一つは相互作用の物理を解明する実験データとしての役割である。後者に対しては、斜入射であること、高速電子の広がりが最低2次元であることなどを考慮し、2次元粒子コードによるシミュレーションとそのポストプロセスが必要と考えられ、現在、このようなアプローチでの研究へ展開する計画である。

5. 謝辞

本研究は、原子力機構の「施設共用制度」にて実施された。研究提案の申請、審査、受け入れ相談、実施にあたっての様々な準備に対応くださった日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究ユニットのプラズマ計測班の方々や J-KAREN レーザーチームに深く感謝いたします。

6. 引用(参照)文献等

1. T. Nishikawa et al., Japanese Journal of Applied Physics **42**, L990 (2003), T. Nishikawa, et al., Appl. Phys. B 78, 885-890 (2004)
2. D. Salzmann, et al., Phys. Rev. E 65, 036402 (2002).
3. L.M.Chen, et. al. Physical Review Letters, 100 045004, (2008).
4. S. Fourmaux, et. al. Applied Physics B-Lasers and Optics, 94(4):569-575, (2009).
5. L. Chen, et. al. Physics of Plasmas, 11(9):4439-4445, (2004).