

高強度レーザー駆動非平衡輻射高Zプラズマの形成過程と輻射特性の解明

Study of nonthermal radiative high Z dense plasma driven by intense short pulse laser

千徳 靖彦¹⁾、岩田 夏弥¹⁾、杉本 馨¹⁾、高木 悠司¹⁾、西内 満美子²⁾、榊 直泰²⁾、今 亮²⁾、Liu Chang²⁾、近藤 康太郎²⁾、畑 昌育²⁾、コーガ ジェームス²⁾

Yasuhiko SENTOKU, Natsumi IWATA, Kaoru SUGIMOTO, Yuji TAKAGI, Mamiko NISHIUCHI, Hironao

SAKAKI, Akira KON, Chang LIU, Kotaro KONDO, Masayasu HATA, James KOGA

¹⁾大阪大学 ²⁾量研

(概要)

本研究においては、重金属プラズマで重要となる高温バルクプラズマからの輻射特性を実験的に計測し、提案者の開発した衝突・電離・輻射過程を組み込んだプラズマ粒子シミュレーションコードPICLSのモデルを検証し高精度化することで、ペタワット級超高強度短パルスレーザーによる固体重金属の加熱過程、電離・衝突・輻射を含めたエネルギー輸送過程の全貌を解明することを目的とする。

キーワード：

超高強度レーザー、重金属プラズマ加熱、非平衡プラズマ

1. 目的

ペタワット (PW) 級の超高強度短パルスレーザーを用いれば、フェムト秒からピコ秒という短時間に重金属の固体を完全電離近くまでイオン化できる。生成される極限的な高電離・高エネルギー密度プラズマは、核物理研究やオパシティなど物性研究のプラットフォームとなり得る。しかし、超高強度レーザーによる高電離プラズマ形成は、強い非平衡状態における電離や高強度 X 線・ガンマ線輻射を伴う複雑過程であり、十分な理解が得られていない。我々は、これまでに、QST 関西光科学研究所の J-KAREN-P レーザーによって得られたデータを、衝突・電離を取り入れた PICLS コードを用いて解析を行うことで、銀 (Z=47) プラズマが電離度約 40 価・温度約 10 keV の高温状態に加熱されていることを明らかにした [1]。しかし、PW 級超高強度レーザーによって生成される極限的なプラズマの形成過程を包括的に理解するためには、より重い金属プラズマへと研究を展開する必要がある。ところが、より重い金属プラズマでは輻射の効果が卓越し、輻射による冷却効果がレーザーによるエネルギー注入過程に対して無視できなくなることが予測される。そこで我々は、重金属プラズマの輻射過程の研究のため、輻射の効果を組み込んだ解析が可能になるよう PICLS コードをさらに発展させ [2]、より重い金属極限プラズマの取り扱いを可能とする条件を整えた。本申請研究では、この発展させた PICLS コードを用い、実験で取得された重金属プラズマからの X 線・ガンマ線のデータを精度よく解析し、超高強度レーザーと固体重金属の相互作用による極限的な輻射プラズマ形成の基礎物理過程を包括的に明らかにすることを目的とする。

2. 方法

2023 年 1, 2 月に行った実験に引き続き、短焦点チェンバーを用いて、J-KAREN レーザーを高強度にて金の薄膜ターゲットに絞り込み実験を行った。2023 年 1, 2 月に行った実験では、45 度の照射角にてターゲットを照射しどこまで加熱されるかを計測したが、今回の実験においては、0 度の照射角度を用い、円偏光及び直線偏光にて照射を行った。以上から照射角度の違い、偏光の違いによるデータセットが取得できたこととなる。

図1に示すような実験セットアップを用い、プラズマミラーを用いることで、照射するレーザー波長のコントラストを向上させて実験を行った。さらに、照射するレーザーの時間波形・位相をショットごとに計測し、発生するX線領域の輻射のスペクトル(結晶分光器およびX線CCDによるシングルフォトンカウンティング法)・電子のスペクトル(1方向)・イオンのスペクトル(2方向)・イオンの空間分布(1方向)・ターゲットと相互作用後のレーザーの空間分布・スペクトル・偏光状態をショットごとに計測した。ターゲットの厚みを変化させ、各々の計測機器の計測結果がどのように変化するかを調査する方式をとり、どこまで金が固体密度を保ったまま加熱可能か、そしてその際にどこまで電離状態が進んでいるかを調査した。

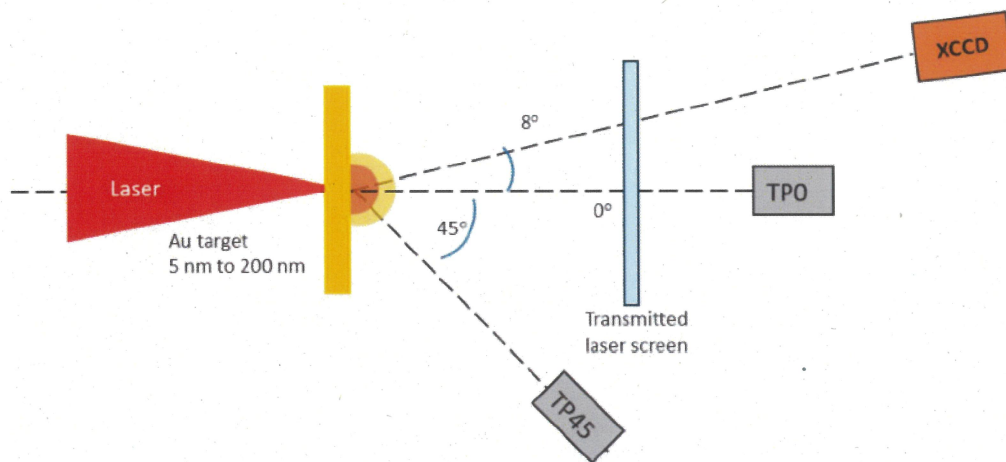


図1: 実験のセットアップの様子

3. 結果及び考察

本実験は、2023年11月から、2023年12月において行ったため、取得したデータのうちほとんどが現在も解析途中であるが、一部解析が進んでいるものに関して報告する。金のターゲットの厚みを変化させることで、X線スペクトルのLシェルラインのピークがどのようにシフトするかを図2に示す。ターゲットが分厚くなるほど、Lシェルラインのピークが高エネルギー側にシフトしているのがクリアに見て取れる。一方において、Lシェルラインのピークは、金の電離度が上がると高エネルギー側にシフトすることが知られており（中性の場合よりも、一部電離されている金の方が、周りの電子による原子核のクーロンポテンシャルの遮蔽が不完全となり、原子核の周りに残っている電子の感じるポテンシャルは大きくなるため）、上記の実験結果は、ターゲットバルク内部における金の平均電荷が高くなっていることを示す。General Relativistic Atomic Structure Package (GRASP)コードを用い、このLシェルラインのピークに相当する金の電離度を求めたところ、一番厚い200nmのターゲットで、+64下の電離状態に相当するものが分かった。今までは、ターゲットから加速された金のエネルギースペクトルをトムソンパラボラにて計測することで、加速された金のエネルギーと価数からターゲットの内部の金の電離度を推測することしかできなかったが、今回導入した、X線CCDのsingle photon counting手法によって、はじめてターゲット内部の金の電離状態を計測することに成功した。+64価まで金を電離する電離過程は、resistive heatingによって高温に加熱されたターゲット内部の電子による、衝突電離過程と考えられる。したがって、これを可能にするには、少なくともそのイオン化エネルギーである6.9keVを超えるエネルギーを持つ電子が存在することを示しており、金のターゲットが高温に加熱されたことを示す結果といえる。

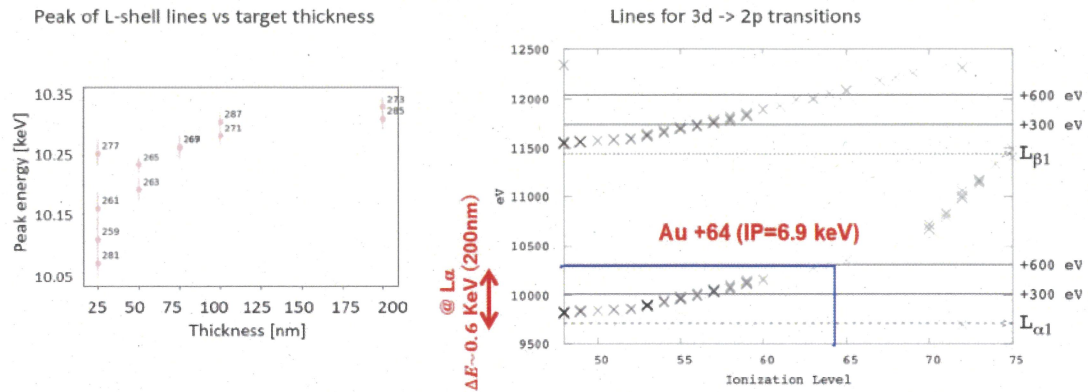


図2：金のLシェルラインのピークがターゲットの厚みを変えることでシフトすることが計測された(左)。GRASPコードにより、Lシェルラインのピークのシフト量と金の電離状態の関係を計算した結果を示す。

4. 引用(参照)文献等

[1] <https://amosgateway.org/grasp/>