

コヒーレント X 線レーザー照射によるキセノンクラスターの 光吸収・電離過程の解明

Photoabsorption and photoionization in Xe clusters irradiated with coherent x-ray laser

難波慎一¹⁾, 長谷川登²⁾, 錦野将治²⁾, 岸本牧²⁾, 河内哲哉²⁾, 田中桃子²⁾, 越智義浩²⁾,
助川鋼太²⁾, 山谷寛²⁾, 永島圭介²⁾

Shinichi NAMBA¹⁾, Noboru HASEGAWA²⁾, Masaharu NISHIKINO²⁾, Maki KISHIMOTO²⁾, Tetsuya KAWACHI²⁾,
Momoko TANAKA²⁾, Yoshihiro Ochi²⁾, Kouta SUKEGAWA²⁾, Hiroshi YAMATANI²⁾ and Keisuke NAGASHIMA²⁾

¹⁾広島大学, ²⁾原子力機構

軟 X 線レーザー・キセノンクラスター相互作用を解明する実験を行っている。我々はこれまでに Xe クラスター内で 4d 内殻電離状態がダブルオージェ過程を経て崩壊する確率が増大することを明らかにした。現在、イオン・電子飛行時間分解分析装置を用いた計測により、この物理機構解明を試みている。

キーワード : X 線レーザー, クラスター, クーロン爆発, 内殻電離, 2 重オージェ崩壊

1. 目的

波長域が赤外から紫外線までのフェムト秒高強度レーザーを希ガスクラスターに照射すると効率よくレーザーエネルギーの吸収が起り、高エネルギー粒子発生や高輝度 X 線源への応用が期待されている。では、より短波長レーザーとクラスター相互作用では一体どうなるのか、という研究に関しては実験に先行して Saalmann らが分子動力学法を用いて数値計算を行った[1]。彼らは X 線領域ではレーザー電場による電子振動の振幅・エネルギーが小さいことから電子衝突加熱が抑制され、多価イオンや高エネルギーイオン発生は期待できないと報告している。一方、実験的には Wabnitz らが VUV-FEL($\lambda=98$ nm, 100 fs)を Xe クラスターに照射する実験を行った。理論的な予測に反し、彼らの TOF 計測の結果は Xe 原子 1 個当たり実に 30 個の光子を吸収し、クーロン爆発が起こることを明らかにした[2]。

本研究の目的は、VUV-FEL と比較してさらに波長が短い X 線レーザー($\lambda=13.9$ nm, ~7 ps, $I \leq 2 \times 10^{10}$ W/cm²)と Xe クラスターの相互作用を明らかにすることにある。ここで特に重要なのは、波長 13.9 nm では Xe 4d 内殻電子を光电離する過程が最も大きな反応断面積を持つということである。なお、放射光を Xe 原子に照射した実験では、この 4d¹ 内殻電離状態は数 fs でオージェ崩壊し、Xe²⁺イオンが支配的に生成されるということが知られている。

2. 方法

実験に使用した X 線レーザーは、プラズマ励起方式によって生成される X 線レーザー(波長: 13.9 nm, 光子エネルギー: 89.2 eV, パルス幅: ~7 ps)である。Xe クラスターは超音速コニカルノズルから高圧ガスを断熱自由膨張させることにより生成した。Hagena による経験式から評価した平均クラスターサイズは数 100~10⁵ atoms/cluster である。X 線レーザーは Mo/Si 多層膜球面鏡で集光させ、ノズル出口から 20 cm 下流にて Xe クラスターに照射した。集光位置での X 線レーザー強度は ~2 × 10¹⁰ W/cm² 以下である。一方、生成される多価イオンは飛行時間分解分析装置(TOF)にて計測した。また、今回は電子エネルギー分布も測定するために、電子用の MCP をイオン TOF 装置と対向するように取り付けた。X 線レーザーの強度は軟 X 線 CCD カメラを用いてモニターした。

3. 研究成果

これまでの我々の研究で、X 線レーザー強度が高いほど、あるいは、クラスターサイズが大きいほどダブルオージェ崩壊過程と呼ばれる Xe 4d¹ 内殻電離状態からの遷移確率が高くなることを明らかにした。このような現象は放射光を用いた同様の実験では観測されない。この現象を解明するためには、レーザー強度依存性、及び、クラスターサイズ依存性をより詳細に調べる必要がある。したがって、今回はまず強度を高めるために光学系を縮小光学系

へと変更し、さらに従来と比べて高性能のガスバルブを用いて、より小さいサイズのクラスターが生成できるようにした。

イオン TOF 計測の結果、前回の実験までに得られていたスペクトルとは全く異なる TOF スペクトルが観測された。最も大きな違いは、明瞭な Xe^{2+} , $3+$ 原子イオンの信号は得られず、ダイマーイオン $(\text{Xe}_2)^{2+}$ が支配的な生成イオンとなったことである。

4. 結論・考察

今回、X 線レーザー・クラスター相互作用によりダイマーイオン $(\text{Xe}_2)^{2+}$ が最も多く発生した原因の一つとして、前回までの X 線レーザー出力エネルギーと比較して今回は一桁近く小さかったことが挙げられる（強度換算では同程度）。その結果、クラスター中の原子は完全には分解されず、比較的小さなクラスターフラグメントが多数生成されたのではないかと考えられる。一方、 $(\text{Xe}_2)^{3+}$ のスペクトルが観測されないことから、ダブルオージェ過程の遷移確率はこの場合小さいことが予想される。この結果は、ダブルオージェ崩壊過程の遷移確率増大には、レーザー強度よりもエネルギーが重要であることを示唆している。

今回の実験で得られた結果を踏まえて、次回の実験では再度光学系を 1:1 に変更し、レーザー出力エネルギーが高い条件下で実験を試みる。特に電子の TOF に重点を置き、高強度 X 線にさらされたクラスター内で何故ダブルオージェ崩壊過程の遷移確率が増大するのかを明らかにする。

5. 引用(参照)文献等

- [1] U. Saalmann and J. M. Rost, Phys. Rev. Lett. **89**, 143401 (2002).
- [2] H. Wabnitz *et al.*, Nature **420**, 482 (2002)