

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⁾, 岸本牧²⁾, 錦野将治²⁾, 助川鋼太²⁾, 山谷寛²⁾, 河内哲哉²⁾, 田中桃子²⁾, 越智義浩²⁾, 永島圭介²⁾

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

¹⁾広島大学, ²⁾原子力機構

従来、原子の内殻電離過程は主に放射光を用いて研究されてきた。本研究では放射光と比べて格段に高強度である軟 X 線レーザーをキセノンクラスターに照射し、その相互作用を初めて解明することを目的とする。

キーワード : X 線レーザー, クラスタ, 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こり、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 Saalman 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 クラスタに照射する実験を行った。理論的な予測に反し、彼らのイオン飛行時間分解計測の結果は 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)と Xe クラスタ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 4*d* 内殻電子を光電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 4*d*¹内殻ホールは数 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、銀プラズマを媒質とする過渡励起方式によって発生する 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 クラスタは超音速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 クラスタに照射した。集光位置での X 線レーザー強度は $\sim 2 \times 10^{10}$ W/cm² 以下である。一方、生成される多価イオン、及び、そのエネルギーは飛行時間分解分析装置(Time-Of-Flight)にて計測した。また、内殻電離により発生する電子のエネルギー分布を測定するために、高速 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 カメラを用いて決定した。

3. 研究成果

これまでのイオン TOF 計測により、高強度 X 線レーザーに照射された Xe クラスタでは、ダブルオージェ崩壊過程と呼ばれる Xe 4*d*¹内殻電離状態から Xe³⁺イオンが発生する遷移確率が高くなることを明らかにした[3]。このような現象は放射光を用いた原子を標的とした実験では観測されない。

この内殻電離に付随する現象を解明するために、電子 TOF 計測を行った。その結果、明

瞭なオーজেピークはほとんど観測されず、5 eV 付近で最大となるエネルギー分布であることが判明した。この分布の解釈として2つの可能性が挙げられる。まず考えられるのは、クラスターは局所的に高密度であるため、内殻電離に伴い発生したオージェ・光電子は弾性・非弾性散乱によりエネルギーが緩和し、これらが計測されるというものである。一方、ダブルオージェ崩壊に伴い発生する電子は、直接的、逐次的崩壊によりエネルギー分布が大きく異なる。直接 $\text{Xe}^+ 4d^1$ 準位から Xe^{3+} へ遷移する過程では、エネルギー分布が連続となることが放射光の実験で明らかにされている（逐次的の場合、一旦 Xe^{2+} イオンの中間準位を経て最終的に Xe^{3+} イオンとなるため、線スペクトルとなる）。従って、実験で得られた低エネルギー側での分布は直接的ダブルオージェ崩壊に起因する可能性がある。

4. 結論・考察

これまでの実験で、高強度 X 線レーザー・Xe クラスター相互作用では内殻ホール($4d^1$)崩壊過程としてダブルオージェが支配的となることが明らかにされており、電子 TOF 計測からこの原因を特定することを試みた。その結果、オーজেピークは線スペクトルとしてはほとんど観測されず、ブロードな電子エネルギー分布であることが分かった。この原因として現在考えているのは、放出電子の散乱や直接ダブルオージェ崩壊（あるいは、両方の寄与）である。散乱の寄与はクラスターサイズが小さくなると無視できるようになるため、今後は様々なサイズのクラスターにおいて電子エネルギー分布を計測し、その特定を行う予定である。

5. 引用(参照)文献等

- [1] U. Saalman and J. M. Rost, Phys. Rev. Lett. **89**, 143401 (2002).
- [2] H. Wabnitz *et al.*, Nature **420**, 482 (2002).
- [3] S. Namba *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 043004 (2007).