

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⁾, 田中桃子²⁾, 越智義浩²⁾, 河内哲哉²⁾
Shinichi NAMBA¹⁾, Noboru HASEGAWA²⁾, Maki KISHIMOTO²⁾, Masaharu NISHIKINO²⁾, Momoko TANAKA²⁾,
Yoshihiro OCHI²⁾, and Tetsuya KAWACHI²⁾

¹⁾広島大学, ²⁾原子力機構

原子力機構が開発したコヒーレント軟 X 線レーザーを希ガスクラスター照射し、その相互作用を明らかにする実験を進めている。照射対象とするのは放射光などで実験が盛んに行われているキセノンクラスターである。今年度は相互作用により発生する電子を飛行時間分解装置(Time-of-Flight Spectrometer)により計測し、エネルギー分布関数を初めて得ることができたので報告する。

キーワード : X 線レーザー, クラスタープラズマ, 内殻電離, オージェ過程

1. 目的

放射光と比較して 1 パルスあたりに含まれる光子数が格段に高く、コヒーレントという特徴を有する X 線源と物質との相互作用では、これまでに観測できなかった X 線域での非線形光学効果などが出現する可能性があり、精力的に研究が行われている。現在までに、この X 線源として高次高調波が主に用いられているが、その特性上多数の次数に対応するスペクトルが同時に現れるため、単一光子エネルギーでの照射が困難である。一方、高次高調波とよく比較されるものとして、プラズマ励起 X 線レーザーがある。この場合、パルス幅が長い、単色に近い光子を照射することができる。

本研究の目的は、原子力機構が開発を進めてきたこのプラズマ励起軟 X 線レーザー(波長 13.9 nm)とキセノン(Xe)クラスターの相互作用を明らかにすることにある。ここで重要なのは、波長 13.9 nm (光子エネルギー: 89.2 eV)では Xe 4d 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。通常この内殻励起状態(Xe 4d¹)は数フェムト秒のオーダーでオージェ脱励起するため、Xe²⁺イオンが最も多く発生することが放射光の実験で報告されている。これまでの実験で、この軟 X 線レーザーを Xe クラスターに照射すると、Xe³⁺の生成効率が最も高くなることが判明している。このことは、内殻電離の脱励起過程としてダブルオージェ崩壊(光電子 1 個、オージェ電子 2 個が放出される)が支配的であることを意味している[1]。

この原因を明らかにするために、相互作用を直接反映すると考えられる電子を飛行時間分解装置で観測することを試みた。実験の結果、相互作用に伴う電子のエネルギー分布関数を初めて得ることに成功し、興味深い現象が観測されたので報告する。

2. 方法

本研究に用いた軟 X 線レーザーは、銀プラズマをレーザー媒質とするプラズマ励起 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ノズルから高压ガスを断熱自由膨張させることにより生成した。Hagen 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れ、圧縮膨張ノズルから 20 cm 下流にて Xe クラスターに照射した。X 線レーザーのエネルギーは、クラスタービームを通過してきた X 線を背面照射型 CCD カメラにて計測し、決定した。

一方、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 Mass Spectrometry: TOF-MS)を用いて計測した。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 分析装置と対向するように取り付けた。この際の観測方向はレーザー偏光面と平行である。なお、光電離において、電子が放出される方向は偏光面に対して角度依存性があることが知られているが、今回の光子エネルギーではいわゆる非等方性パラメー

タは小さく、電子放出方向の角度依存性はない。

3. 研究成果

これまでの実験で、相互作用により Xe クラスタ内ではダブルオーজে崩壊過程に伴う Xe $4d^1$ 内殻電離状態から Xe $^{3+}$ イオンが発生する脱励起の遷移確率が高くなることを見いだした。このダブルオーজে遷移確率増大メカニズムを解明するために電子 TOF 計測を行い、エネルギー分布を調べた。

実験で得られたデータから電子エネルギー分布関数を評価した結果、光電子やオーজে電子に付随する鋭いスペクトルピークは観測されず、低エネルギー側では数 eV 程度の Maxwell 分布に近いようなエネルギー分布であることが判明した。バルクターゲットから電子が原子との弾性・非弾性散乱を被らずに表面から脱出できるおおよその距離は 1 nm であり、クラスタサイズは本実験の場合 nm 以下であるため、原子・電子衝突のエネルギー緩和により熱化したとは考えにくい。

現在、この原因はクラスタ内での電子・電子衝突によるエネルギー緩和にあると考えている。実際、本実験条件下で光電離・電子衝突電離を考慮した Xe 原子から Xe $^{4+}$ イオンまでのレート方程式を解いた結果、クラスタ内の原子は約 10%電離されることが分かった[2]。クラスタ内の原子数密度は 10^{21} cm^{-3} 以上であることを考えれば強結合クラスタプラズマの発生が予想される[3]。この結果については、今後数値計算により確かめる予定である。

一方、Xe を He 希釈して大きなクラスタを発生させ、これをターゲットにした場合には高エネルギー側でのエネルギー成分が大幅に増大することも判明した。今後、このデータが再現されるのか、また、レーザー強度と共にどのような振る舞いを見せるかについて調べていく予定である。

4. 結論

高強度 X 線レーザー・Xe クラスタ相互作用に伴う発生する電子のエネルギー分布を調べた。その結果、強結合クラスタプラズマが発生していることを示唆するデータが得られた。さらに、He 希釈により発生する大きな Xe クラスタにレーザー照射した場合、高エネルギー電子成分が大幅に増大することが判明した。今後、レーザー強度を変化させて、エネルギー分布関数がどのように変化していくのかを調べる予定である。

5. 引用(参照)文献等

- [1] S. Namba *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 043004 (2007).
- [2] S. Namba *et al.*, J. Phys. Conf. Series. (to be published).
- [3] C. Jungreuthmayer *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **38** 3029 (2005).