

高強度 X 線レーザー照射によるキセノンクラスターの内殻電離ダイナミクス

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⁾, 河内哲哉²⁾

Shinichi NAMBA¹⁾, Noboru HASEGAWA²⁾, Maki KISHIMOTO²⁾, Masaharu NISHIKINO²⁾, and Tetsuya KAWACHI²⁾

¹⁾広島大学, ²⁾原子力機構

軟X線レーザーを多数の原子の集合体であるキセノンクラスター照射し、その相互作用を解明することを行っている。このX線レーザーの光子エネルギー(89.2 eV)は、Xeの内殻電離を引き起こすのに十分である、という特徴がある。飛行時間分解法により発生する電子のエネルギーを評価したところ、興味深い分布関数が得られたので報告する。

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

赤外・紫外域波長の超短パルスレーザーとクラスターの相互作用は、高エネルギーイオン源や高輝度X線光源開発への応用の観点から精力的に研究が行われている。しかしながらより波長が短い軟X線や真空紫外域のレーザーとクラスターの相互作用の物理はまだ十分に理解されていないのが現状である。

このような観点から、我々は“コヒーレントX線レーザー（波長；13.9 nm）とクラスターとの相互作用”を実験的に解明することを試みている。特にこれまでの研究で、キセノンクラスターに高強度X線レーザーを照射するとダブルオージェと呼ばれる内殻ホール崩壊過程が支配的となることを突き止めた。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ておらず、高強度X線に晒されたクラスター特有のものと考えられる。したがって本研究では、このダブルオージェ遷移確率の増大メカニズムを電子エネルギー分布計測から明らかにすることを目的とする。

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のエネルギー分布を飛行時間分解法で観測することを試みたので、その結果について報告する。

2. 方法

プラズマ励起X線レーザーは原子力機構が開発を進めてきたものであり、波長: 13.9 nm, 光子エネルギー: 89.2 eV, パルス幅: ~7 ps という特徴がある。また、本年度よりレーザーの繰り返しが 15 min./shot から 0.1 Hz へと大幅に高繰り返し化が図られたので、飛躍的に光学系のアライメント調整が容易になり、さらに実験データの積算も可能となった (S/N 比の向上)。Xe クラスター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、地磁気の影響により電子の軌道が曲げられないよう、フライトイチューブは強磁性体であるミューメタル製とし、さらに検出効率を上げるために大型 MCP(有効径 42mmΦ)を用いた。多層膜 Mo/Si ミラーが S 偏光用であるため、電子観測方向はレーザー偏光面と平行とした。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

軟X線レーザー・Xe クラスター相互作用ではダブルオージェ崩壊過程に伴う Xe 4d¹ 内殻電離状態から Xe³⁺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。このダブルオージェ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。その結果、光電子やオージェ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[1]。

ここで、今回用いた X 線レーザーの光子エネルギーにおける内殻電離断面積は約 16 Mb と非常に大きく、オージェ崩壊により自動的に 2 価イオン以上のイオンが発生する。一般に、光電離では低温高密度のプラズマ、つまり、運動エネルギーに比べてポテンシャルエネルギーが大きい強結合プラズマ状態となりやすいことが知られており、今回の実験結果は内殻電離誘起の強結合プラズマが発生していることを示唆している。一方、このような特異な環境下では、高密度効果により電子エネルギー準位の構造が変化することが理論的に示されている[REF.]。以上のことから、クラスター中では光電子密度効果により Xe 4d-1 からダブルオージェ崩壊を経て Xe³⁺イオンに至る崩壊ルートが増え、その結果として孤立系の単一原子の場合と比較してその遷移確率が増大した、と考えられる。

現在、電子検出効率が高い磁気ボトル型電子分光器を開発しており、次回はこの装置を用いて電子の精密なエネルギー分布を計測する予定である。

4. 結論

軟 X 線レーザー・Xe クラスター相互作用ではダブルオージェ崩壊過程に伴う Xe 4d¹ 内殻電離状態から Xe³⁺イオンが発生する脱励起の遷移確率が高くなる。この原因を明らかにするために、電子エネルギー分布を計測した。その結果、ダブルオージェ崩壊の遷移確率増大は、光電離による内殻電離誘起の強結合プラズマの発生に起因する可能性があることが明らかとなった。

5. 引用(参照)文献等

- [1] S. Namba *et al.*, X-ray laser 2010 (2010 年 5 月 韓国にて発表予定).
- [2] A. V. Gets and V. P. Krainov, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **39**, 1787 (2006).