

X線自由電子レーザー照射によるキセノンクラスターにおける ナノプラズマ生成

¹東北大多元研, ²理研RSC, ³京大院理, ⁴広大院理, ⁵トゥルク大, ⁶タルトゥ大, ⁷SOLEIL, ⁸ELI-NP, ⁹ゲーテ大, ¹⁰北京航空航天大学, ¹¹JASRI, ¹²ハイデルベルグ大
熊谷 嘉晃¹, ○福澤 宏宣^{1,2}, 本村 幸治¹, Iablonskyi Denys¹, 永谷 清信^{2,3},
和田 真一^{2,4}, 伊藤 雄太¹, 高梨 司¹, 榊原 悠太¹, You Daehyun¹, 西山 俊幸³,
浅 和貴³, 佐藤 由比呂³, 梅本 嵩之⁴, 仮屋 寛悟⁴, Kukk Edwin⁵, Kooser Kuno^{5,6},
Nicolas Christophe⁷, Miron Catalin^{7,8}, Asavei Theodor⁸, Negau Liviu⁸,
Schöffner Markus⁹, Kastirke Gregor⁹, Liu Xiao-Jing¹⁰, 大和田 成起², 片山 哲夫¹¹,
富樫 格¹¹, 登野 健介¹¹, 矢橋 牧名^{2,11}, Gokhberg Kirill¹², Cederbaum Lorenz¹²,
Kuleff Alexander¹², 上田 潔^{1,2}

Nanoplasma formation in xenon clusters irradiated by X-ray free-electron laser

Yoshiaki Kumagai¹, ○Hironobu Fukuzawa^{1,2}, Koji Motomura¹, Denys Iablonskyi¹,
Kiyonobu Nagaya^{2,3}, Shin-ichi Wada^{2,4}, Yuta Ito¹, Tsukasa Takanashi¹, Yuta Sakakibara¹,
Daehyun You¹, Toshiyuki Nishiyama³, Kazuki Asa³, Yuhiro Sato³, Takayuki Umemoto⁴,
Kango Kariyazono⁴, Edwin Kukk⁵, Kuno Kooser^{5,6}, Christophe Nicolas⁷, Catalin Miron^{7,8},
Theodor Asavei⁸, Liviu Negau⁸, Markus Schöffner⁹, Gregor Kastirke⁹, Xiao-Jing Liu¹⁰,
Shigeki Owada², Tetsuo Katayama¹¹, Tadashi Togashi¹¹, Kensuke Tono¹¹, Makina Yabashi^{2,11},
Kirill Gokhberg¹², Lorenz Cederbaum¹², Alexander Kuleff¹², Kiyoshi Ueda^{1,2}

¹ *Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Japan*

² *RIKEN SPring-8 Center, Japan*

³ *Department of Physics, Kyoto University, Japan*

⁴ *Department of Physical Science, Hiroshima University, Japan*

⁵ *Department of Physics and Astronomy, University of Turku 20014 Turku, Finland*

⁶ *Institute of Physics, University of Tartu, Estonia*

⁷ *Synchrotron SOLEIL, France*

⁸ *Extreme Light Infrastructure - Nuclear Physics (ELI-NP), Romania*

⁹ *Institut für Kernphysik, Goethe-Universität Frankfurt, Germany*

¹⁰ *School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, China*

¹¹ *Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), Japan*

¹² *Theoretische Chemie, PCI, Universität Heidelberg, Germany*

【Abstract】 Recent studies revealed that nanoplasma is formed when an X-ray free-electron laser pulse interacts with any nano-object, but the formation process itself has never been decrypted and its time scale was hitherto unknown. With the help of improved time-resolved ion methodology using a near infrared laser pulse as probe, we studied the early stage of the process. We observed a surprisingly fast population (~12 fs), followed by a slower depopulation (~310 fs) of highly excited atomic fragments generated in the process of nanoplasma formation. Inelastic scattering of Auger electrons and interatomic Coulombic decay are suggested as the key mechanisms responsible for the population and depopulation of these states, respectively.

【序】 SACLA から得られる高強度かつ短パルスの X 線自由電子レーザー (XFEL) を希ガス原子クラスターに照射することにより、ナノプラズマが生成することが明らかになった[1]。本研究では、XFEL 誘起ナノプラズマの生成過程を明らかにするため、近赤外レーザーと組み合わせたポンプ・プローブ法による時間分解イオン分光を行った[2]。

【実験方法】 実験は XFEL 施設 SACLA のビームライン BL3, 実験ハッチ EH4 で行った[3]。XFEL パルスはビームライン常設の KB ミラーにより 1 μm 程度に集光し、標的試料であるキセノンクラスターに照射した。XFEL の光子エネルギーは 5.5 keV, パルス幅は約 10 fs である。近赤外レーザーは、集光レンズにより 100 μm 程度に集光して照射した。近赤外レーザーの光子エネルギーは 1.55 eV, パルス幅は 32 fs である。キセノンクラスターはガスノズルからキセノンガスを噴出させ、断熱膨張により生成し、超音速パルスクラスタービームとして集光点に導入した。反応点で生成したイオンを、位置敏感検出器を備えた飛行時間型イオン分光器で計測した。XFEL パルスと近赤外パルスの照射タイミングのジッターは、アライバルタイミングモニターにより測定した[4]。XFEL の照射により、キセノンクラスターから誘起されたナノプラズマに対し、近赤外レーザーをプローブ光として照射し、XFEL パルスに対する近赤外パルスの遅延時間の関数としてイオン収量を得た。

【結果・考察】 キセノンクラスターへの XFEL 照射により放出されるイオンは、1 価と 2 価のキセノン原子イオンが主であった。XFEL 照射後に NIR レーザーを照射することで、これらのイオン収量に顕著な遅延時間依存性が観測された。キセノン 2 価原子イオンでは、XFEL 誘起ナノプラズマの NIR レーザー加熱に由来した、1 ps 程度かけて収量が増加する様子が観測された。この収量増加から、プラズマ崩壊（膨張、熱電子放出、電子-イオン再結合）に伴う電子密度の減少を捉えることに成功した。一方で、キセノン 1 価原子イオンでは、2 価原子イオンで観測された時間構造に加えて、10 fs 程度の急激な増加と 300 fs 程度の減少が観測され、XFEL 誘起ナノプラズマ生成のごく初期段階における、高励起原子の生成・失活の密接な寄与が示唆された。

【参考文献】

- [1] T. Tachibana *et al.* *Sci. Rep.* **5**, 10977 (2015).
- [2] K. Kumagai *et al.* submitted.
- [3] K. Tono *et al.* *New J. Phys.* **15**, 083035 (2013).
- [4] T. Katayama *et al.* *Struct. Dyn.* **3**, 034301 (2016).