

### 3A04

#### X線自由電子レーザーによる希ガス原子の多光子多重イオン化

(東北大・多元研<sup>1</sup>, 理研・放射光科学総合研究センター<sup>2</sup>, CFEL<sup>3</sup>,  
Synchrotron SOLIEL<sup>4</sup>, Uppsala Univ.<sup>5</sup>, 京大・院理<sup>6</sup>, 広大・院理<sup>7</sup>,  
Lund Univ.<sup>8</sup>, Imperial Univ.<sup>9</sup>, Univ. Turku<sup>10</sup>, ASG CFEL<sup>11</sup>, JASRI<sup>12</sup>)  
福澤 宏宣<sup>1,2</sup>, Son Sang-Kil<sup>3</sup>, 本村 幸治<sup>1</sup>, Mondal Subhendu<sup>1</sup>, Liu XiaoJing<sup>4</sup>,  
Feifel Raimund<sup>5</sup>, 永谷 清信<sup>2,6</sup>, 和田 真一<sup>2,7</sup>, 立花 徹也<sup>1</sup>, 伊藤 雄太<sup>1</sup>,  
木村 美紅<sup>1</sup>, 酒井 司<sup>6</sup>, 松波 健司<sup>6</sup>, 林下 弘憲<sup>7</sup>, 梶川 隼平<sup>7</sup>, Johnsson Per<sup>8</sup>,  
Siano Marco<sup>9</sup>, Kukk Edwin<sup>10</sup>, Rudek Benedikt<sup>11</sup>, Erk Benjamin<sup>11</sup>, Foucar Lutz<sup>11</sup>,  
Robert Emmanuel<sup>4</sup>, Miron Catalin<sup>4</sup>, 登野 健介<sup>12</sup>, 富樫 格<sup>12</sup>, 犬伏 雄一<sup>2</sup>,  
佐藤 堯洋<sup>2</sup>, 片山 哲夫<sup>12</sup>, 初井 宇記<sup>2</sup>, 亀島 敬<sup>12</sup>, 矢橋 牧名<sup>2</sup>,  
八尾 誠<sup>6</sup>, Santra Robin<sup>3</sup>, 上田 潔<sup>1,2</sup>

#### Multiphoton multiple ionization of rare-gas atoms by X-ray free-electron laser

(IMRAM, Tohoku Univ.<sup>1</sup>, RSC<sup>2</sup>, CFEL<sup>3</sup>, Synchrotron SOLIEL<sup>4</sup>,  
Uppsala Univ.<sup>5</sup>, Kyoto Univ.<sup>6</sup>, Hiroshima Univ.<sup>7</sup>, Lund Univ.<sup>8</sup>,  
Imperial Univ.<sup>9</sup>, Univ. Turku<sup>10</sup>, ASG CFEL<sup>11</sup>, JASRI<sup>12</sup>)  
Hironobu Fukuzawa<sup>1,2</sup>, Sang-Kil Son<sup>3</sup>, Koji Motomura<sup>1</sup>, Subhendu Mondal<sup>1</sup>,  
XiaoJing Liu<sup>4</sup>, Raimund Feifel<sup>5</sup>, Kiyonobu Nagaya<sup>2,6</sup>, Shin-ichi Wada<sup>2,7</sup>,  
Tetsuya Tachibana<sup>1</sup>, Yuta Ito<sup>1</sup>, Miku Kimura<sup>1</sup>, Tsukasa Sakai<sup>6</sup>, Kenji Matsunami<sup>6</sup>,  
Hironori Hayashita<sup>7</sup>, Jumpei Kajikawa<sup>7</sup>, Per Johnsson<sup>8</sup>, Marco Siano<sup>9</sup>, Edwin Kukk<sup>10</sup>,  
Benedikt Rudek<sup>11</sup>, Benjamin Erk<sup>11</sup>, Lutz Foucar<sup>11</sup>, Emmanuel Robert<sup>4</sup>, Catalin Miron<sup>4</sup>,  
Kensuke Tono<sup>12</sup>, Tadashi Togashi<sup>12</sup>, Yuichi Inubushi<sup>2</sup>, Takahiro Sato<sup>2</sup>,  
Tetsuo Katayama<sup>12</sup>, Takaki Hatsui<sup>2</sup>, Takashi Kameshima<sup>12</sup>, Makina Yabashi<sup>2</sup>,  
Makoto Yao<sup>6</sup>, Robin Santra<sup>3</sup>, Kiyoshi Ueda<sup>1,2</sup>

自己増幅自発放射 (SASE) 型の自由電子レーザー (FEL) の発展に伴い, 極短波長領域でのレーザー光を利用することが可能となり, その波長領域はついに X 線領域まで到達した. 日本にも X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA が建設され[1], 本年 3 月よりユーザー運転が開始されたばかりである. 本研究では SACLA から得られる X 線レーザーパルスを集光してアルゴン原子およびキセノン原子に照射し, 生成する多価イオンを飛行時間型イオン分光計により測定することで, X 線多光子過程の観測を試みた.

実験は SACLA のビームライン BL3, 実験ハッチ EH3 で行った. XFEL 光は EH3 に常設されている K-B ミラー集光システムにより集光して反応チャンバーに導入した. XFEL 光をパルス超音速分子線として導入された気体試料と集光点において交差させ, 生成するイオンを飛行時間型イオン分光計で観測した. このイオン分光計には位置敏感検出器が備えてあり, 飛行時間だけでなく検出位置の情報も用いることで分解能を向上させた. 反応領域を通過した XFEL 光はベリリウム窓を通して大気中に引き出し, PIN フォトダイオードで検出することで光強度データを各 XFEL パルスごとに得た. イオン収量の強度依存性を広範囲に取得する測定では, K-B ミラー集光システムの上流にアルミ箔を挿入することで XFEL 光の強度を減衰させた. 本研究で用いた光のエネルギーは 5.5 keV である.

標的をアルゴン原子とした実験では, 最大 10 価のイオンが検出された. このよう

な多価イオンは X 線 1 光子吸収では観測されていない [2, 3]. イオン収量の光強度依存性から, 1 光子吸収の寄与と 2 光子吸収の寄与との比を見積もり, 理論計算による予測と詳細に比較することによって, 光のフルエンスを決定した.

キセノン原子の場合, L 殻のイオン化しきい値が 5 keV 付近にあるため, 5.5 keV の光エネルギーでは光吸収断面積が大きく, アルゴン原子よりもさらに多くの光子を吸収することが予測される. 図 1 に得られたイオン飛行時間スペクトルを示す. 最大 26 価のキセノン原子イオンが観測された. これほどの多価イオンはやはり X 線 1 光子吸収では観測されていない[4]. イオン収量の光強度依存性から 4 光子吸収が起きていることが分かり, この結果は理論計算による結果とほどよく一致した.

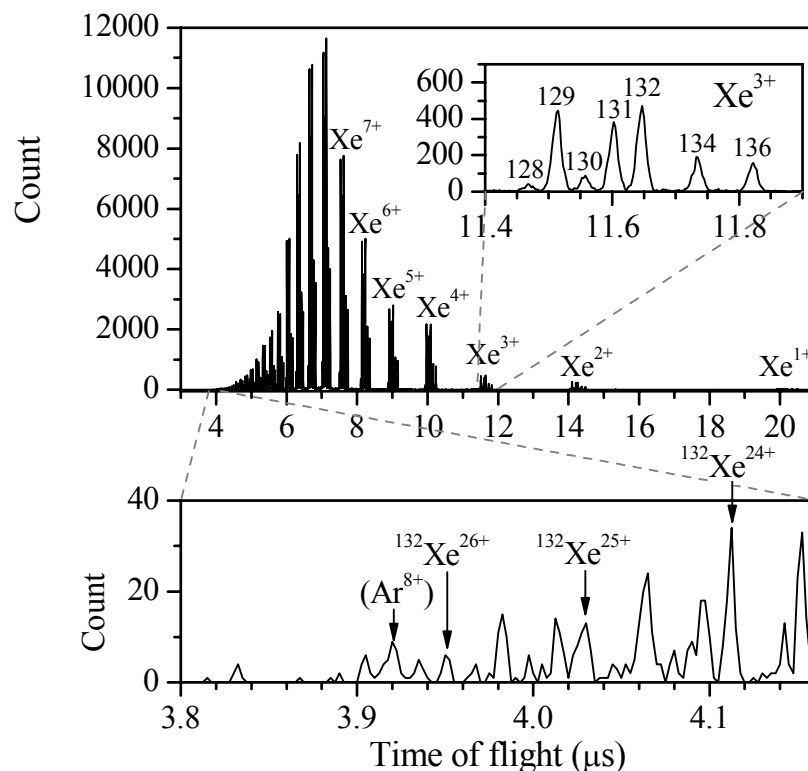


図 1. 5.5 keV の XFEL パルスをキセノン原子に照射した際のイオン飛行時間スペクトル

本研究は文部科学省の X 線自由電子レーザー利用推進研究課題および X 線自由電子レーザー重点戦略研究課題, 理化学研究所の SACLA 利用装置提案課題として援助を受け行われました.

#### 参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, Nature Photonics **6**, 540 (2012).
- [2] T. A. Carlson and M. O. Krause, Phys. Rev. **137**, A1655 (1965).
- [3] K. Ueda *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **24**, 605 (1991).
- [4] T. Mukoyama *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **20**, 4453 (1987).