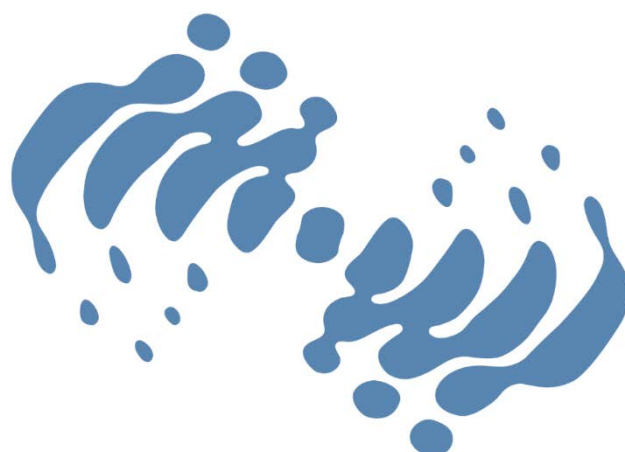


原子衝突学会誌

しょうとつ

第 12 巻
第 1 号
2015 年

シリーズ 「短波長自由電子レーザーによる原子分子光物理」
極紫外自由電子レーザー光照射による
励起原子集団からの蛍光観測 岩山洋士



**THE ATOMIC COLLISION
SOCIETY OF JAPAN**

原子衝突学会賛助会員（五十音順）

アイオーピー・パブリッシング・リミテッド（IOP 英国物理学会出版局）

Institute *of* Physics

<http://journals.iop.org/>

アステック株式会社

ASTECH
CORPORATION

<http://www.atechcorp.co.jp/>

アドキャップバキュームテクノロジー株式会社

ADCAP

<http://www.adcap-vacuum.com>

有限会社イーオーアール



Electronics Optics Research Ltd.

<http://www.eor.jp/>

株式会社オプティマ

Optima Corp.

<http://www.optimacorp.co.jp/>

キャンベラジャパン株式会社

A
CANBERRA

<http://www.canberra.com/jp/>

クリムゾン インタラクティブ プライベート リミテッド

enago[™]

<http://www.enago.jp/>

<http://ulatus.jp/>

<http://www.voxtab.jp/>

株式会社サイエンス ラボラトリーズ



株式会社 サイエンス ラボラトリーズ

<http://www.scilab.co.jp/>

真空光学株式会社

真空光学株式会社 - Vacuum & Optical Instruments -

<http://www.shinku-kogaku.co.jp/>

スペクトラ・フィジックス株式会社

 Spectra-Physics®
A Newport Company

<http://www.spectra-physics.jp/>

ソーラボジャパン株式会社

 THORLABS

<http://www.thorlabs.jp/>

ツジ電子株式会社

 TSUJICON
ツジ電子株式会社

<http://www.tsujicon.jp/>

株式会社東京インスツルメンツ

 TOKYO INSTRUMENTS, INC.

<http://www.tokyoinst.co.jp/>

株式会社東和計測

 Touwa
Keisoku

<http://www.touwakeisoku.co.jp/>

株式会社トヤマ

 TOYAMA
サイエンスをかたちにするテクノロジー

<http://www.toyama-jp.com/>

株式会社ナバテック

真空機器の未来と歩む
Navatec

<http://www.navatec.co.jp/>

仁木工芸株式会社



<http://www.nikiglass.co.jp/>

伯東株式会社



<http://www.g5-hakuto.jp/>

株式会社パルスパワー技術研究所



<http://www.mypj.com>

丸善株式会社



<http://kw.maruzen.co.jp/>

丸菱実業株式会社

丸菱実業株式会社

<http://www.ec-marubishi.co.jp/>

MARUBISHI CORPORATION

株式会社ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション



<http://www.labo-eq.co.jp/>

しょうとつ

第 12 卷 第 1 号



THE ATOMIC COLLISION
SOCIETY OF JAPAN

目 次

シリーズ「短波長自由電子レーザーによる原子分子光物理」 極紫外自由電子レーザー光照射による 励起原子集団からの蛍光観測	岩山洋士	...5
談話室 科学者として生きるあなたへ	青島国広	...13
第 22 回原子衝突セミナーのお知らせ	行事委員会委員長	...16
2015 年度原子衝突学会役員選挙の結果	選挙管理委員会	...16
国際会議発表奨励賞について	顕彰委員会委員長	...17
国際会議発表奨励事業による会議報告 ■国際会議 (PPC-11) 参加報告 ■国際会議 (PPC-11) 参加報告	山下琢磨 佐野陽祐	...18 ...18
第 16 回原子衝突学会若手奨励賞募集要項 (締切日変更)	顕彰委員会委員長	...19
学会協賛学会会合のご案内 ■第 31 回化学反応討論会のご案内	庶務委員会	...20
原子衝突若手の会第 35 回秋の学校 開催報告	吉田慎太郎	...20
「しょうとつ」原稿募集	編集委員会事務局	...22
ユーザー名とパスワード		...22

短波長自由電子レーザーによる原子分子光物理 極紫外自由電子レーザー照射による励起原子集団からの蛍光観測

岩山洋士

分子科学研究所 UVSOR 〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中 38

iwayama@ims.ac.jp

平成 26 年 11 月 14 日原稿受付

極めて高効率な光イオン化・励起源である極紫外自由電子レーザー光は、高密度のイオンや励起原子集団の生成を可能にする。高密度のイオンや励起原子集団は、希薄な系とは大きく異なる挙動を示すことが期待されるが、高密度ゆえに空間電荷効果の影響が大きく、荷電粒子はプローブとして使えない。我々は、蛍光緩和に注目し、極紫外自由電子レーザー光が誘起する高密度の励起原子、および希ガス・クラスターの挙動を観測した。本稿では、それらの結果について紹介する。

1. 研究背景

自由電子レーザー (FEL: Free Electron Laser) 技術の進展により、赤外・可視光領域に加え、極紫外 (EUV: Extreme UltraViolet) 領域から硬X線領域におよぶ短波長領域における高強度レーザー光源が実現され[1-4]、幅広い波長領域における高強度レーザー場と物質との相互作用について、近年、盛んに研究が行われているのは既報の通りである。赤外・可視光領域では、トンネルイオン化と呼ばれる強い光電界電離や、レーザー電場によって加速された電子と原子・イオンとの衝突によるプラズマ加熱など、光電界が大きな役割を果たすのに対して、波長 100 nm 以下の領域では、トンネルイオン化は殆ど起こらず、価電子による1光子または多光子吸収過程が主に起こる。EUV や軟X線のような、より短波長領域になると、価電子のみならず、内殻電子の励起や電離が起こるので、内殻空孔状態のオーグメント緩和により、多重電離過程が促進される[5]。

本稿で取り上げる EUV 領域は、光イオン化が極めて高効率に起こることがその特徴の一つである。波長 50 nm の1光子のエネルギーは、24.8 eV であり、ヘリウム原子を除くすべての原子、および分子の第一イオン化ポテンシャルよりも高い。従って、原子や分子は、この1光子を吸収することによりイオン化される。また、価電子のしきい値

近傍は、一般に光吸収断面積が極めて大きい。図 1 に、波長 50 nm におけるアルゴン原子のイオン化確率の光強度依存性を示す。図 1 は、アルゴン原子に EUV-FEL 光を集光照射した場合、EUV-FEL の典型的な光強度である 10^{13} W/cm² 程度に達すると、すべての原子がイオン化されることを意味している。イオン質量分析法による研究に依れば、EUV-FEL 照射下のアルゴン原子は、1光子吸収にとどまらず、多光子吸収が強く観測され、最大 18 個もの光子を吸収していることが報告されている[6]。

EUV-FEL 光の集光点においては、すべての原子・分子をイオン化または励起することができ

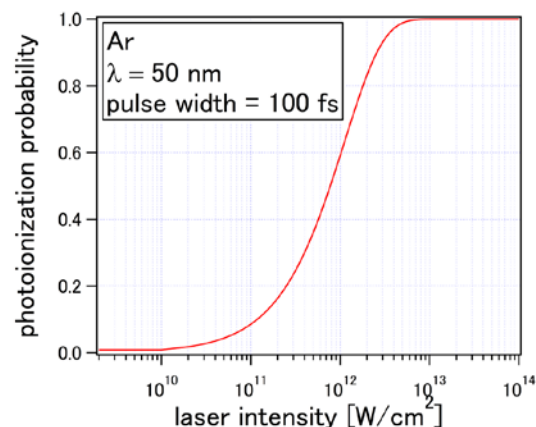


図 1: 極紫外光レーザー照射によるアルゴン原子のイオン化確率。

るので、試料ガスを適切に導入することによって、高密度の励起原子集団を生成することが可能となる。一方、 10^{-8} Pa という超高真空でさえ、残留ガスの原子密度は $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ に対応するため、EUV-FEL 光の集光点付近では、バックグラウンドとなるイオンおよび電子が多量に発生することになる。また、十分に希薄な系を観測対象として選ばなければ、イオン化領域における空間電荷効果のために、電子およびイオンの運動エネルギーや角度分布が正しく計測できない。固体を試料とした光電子分光実験においては、空間電荷効果が深刻な影響を及ぼし、EUV-FEL 光の高強度性を利用できないことが報告されている [7]。

我々は、EUV-FEL 光照射による高密度の励起原子集団の挙動を観測するため、励起原子からの蛍光に着目した。蛍光測定では、荷電粒子の観測では避けられない空間電荷効果を気にする必要がなく、高分解能で蛍光波長を分析することにより、様々な励起状態を特定することができる。また、時分割観測により、励起原子集団の脱励起ダイナミクスに関する情報が得られる可能性がある。

本稿では、EUV-FEL 光照射されたヘリウム原子 [8] および希ガス・クラスター [9] からの蛍光観測について紹介する。ヘリウム原子の実験では、 $1s \rightarrow 3p$ 共鳴励起に対応する波長 53.7 nm の EUV-FEL 光を用いることで、高密度の励起ヘリウム原子集団を生成し、多数の励起原子が協調的に緩和する超蛍光現象の観測に成功した。一方、希ガス・クラスターの実験では、入射した EUV-FEL の波長よりも短波長の蛍光の観測に成功している。これら 2 つの結果はともに、EUV-FEL 光の高強度と短パルス性を活かしたものである。

2. EUV-FEL 励起による蛍光の観測例

2.1 ヘリウム原子

励起原子の自然放出、つまり蛍光緩和の寿命は、励起状態および緩和状態によって決まる。図 2 に示したように、 $\text{He } 1s3p$ 励起状態から $1s^2$ 状態への蛍光緩和 (蛍光波長 53.7 nm) 寿命は 1.7 ns であり、 $1s2s$ 状態への蛍光緩和 (蛍光波長 501.6 nm) の寿命は 77 ns である。自然放出は、

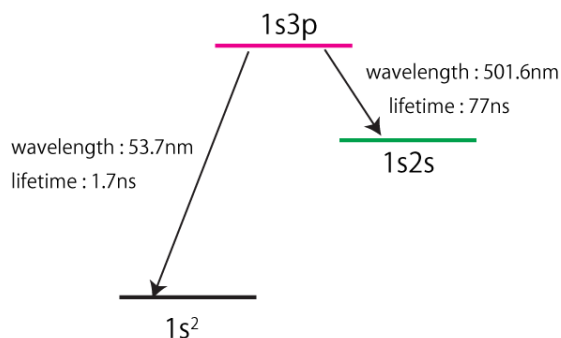


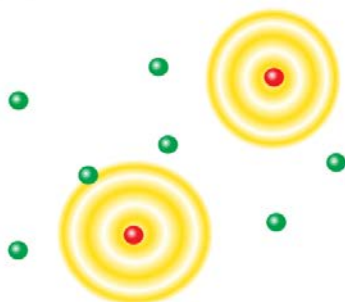
図 2: 励起ヘリウム原子 ($1s3p$) の自然放出の概念図。

誘導放出とは異なり、原子が置かれている電磁場の強さには依存しないため、励起状態および緩和状態の電子構造だけに依存する。しかし、自然放出過程も光子生成を伴うため、原子だけでなく電磁場も含めた、“原子+電磁場”という量子力学系を考える必要がある。 N 個の励起原子の蛍光緩和は、それぞれ励起原子が十分時間的・空間的に離れていれば、それらが感じている電磁場を独立して扱うことができ、 N 個の独立した“励起原子+電磁場”という系を考えることになる。そのため放射光のような弱い電磁場下では、図 3(a)のように、励起原子はそれぞれ独立な電磁場と相互作用し蛍光緩和するとみなせる。その結果、蛍光強度は励起原子数に比例し、蛍光緩和の寿命は原子の電子構造にのみ依存するので、蛍光強度の時間発展は、図 4(a)のような指数関数的減衰曲線となる。

しかし、高密度の励起原子集団では大きく状況が異なる。励起原子間距離が蛍光波長程度よりも短くなれば、もはや N 個の独立した“励起原子+電磁場”の系として扱うことはできない。すなわち“ N 個の原子+電磁場”という 1 つの量子力学系を考える必要がある。複数の励起原子が共通の電磁場との相互作用を通して、図 3(b)のように協調的な蛍光緩和を起こす [10]。これが超蛍光である。

気相の場合、励起原子間には 10 nm 以上も離れている。それでも、蛍光波長程度に一つ以上の励起原子が存在する状況が実現されれば、励起原子同士の直接の相互作用はなくとも、協調的な緩和現象が現れる。超蛍光現象を観測するた

(a) spontaneous emission



(b) superfluorescence

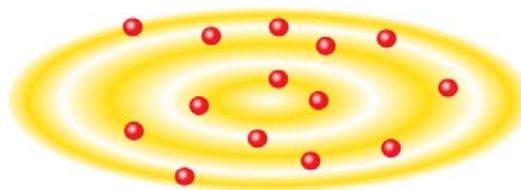


図 3: 自然放出および超蛍光の概念図. 赤丸は励起原子, 緑丸は基底原子を表し, 黄色はそれぞれの励起原子の蛍光緩和の電磁場を表す.

めには, 高密度の励起集団を生成する必要があるため, 従来, 超蛍光に関する研究の殆どは, マイクロ波または赤外光領域に限られていた[11-13].

大強度の EUV-FEL 光を用いれば, 原子・分子の非常の多くの励起状態を高密度に生成することができる. しかし, 前述のように, 超蛍光を観測するためには, 励起原子の平均原子間距離を蛍光波長より短くしなければならない. $1s3p$ から $1s2s$ 状態への遷移に対応する波長 501.6 nm において, 波長空間あたり1原子という密度は $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ に相当し, 圧力に換算すると 0.03 Pa になる. また, 超蛍光が起こるためには反転分布が必要である. EUV-FEL の繰り返し周波数は, 30 Hz 程度であり, EUV-FEL パルス光間の時間間隔は十分長いため, 直前のパルス光で励起された原子は, 次のパルス光照射までに全て基底状態に緩和していると考えてよい. しかし光強度お

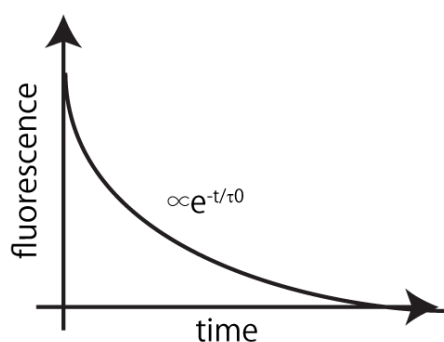
よび吸収断面積は十分に大きいので, EUV-FEL 照射によって, 平均的に 50% までの原子が $1s3p$ 状態に励起されることになり, $1s2s$ 状態との間に反転分布が形成される.

超蛍光現象については, 1954 年に Dicke が初めて理論的な考察を行った[10]. 図 4(b)に, 超蛍光の時間発展の概念図を示す. 励起原子の数を N とすると, 超蛍光には次のような特徴があることが知られている[10].

- (1) 励起原子が協調的緩和を起こすため, 自然放出率より速いパルス状の時間発展を示し, パルス幅 t_{width} は N に反比例する.
- (2) 遅延時間 t_{delay} が存在し, t_{delay} は N に反比例する.
- (3) パルスのピーク強度は, N の二乗に比例する.
- (4) 指向性が高い.

実験は, SPring-8 サイトに建設された SCSS 試験加速器[1]を用いて行われた. EUV-FEL 光は,

(a) spontaneous emission



(b) superfluorescence

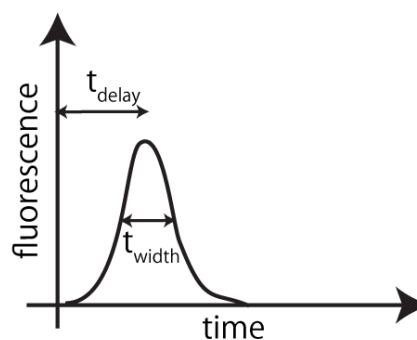


図 4: (a)自然放出と, (b)超蛍光の時間構造の概念図.

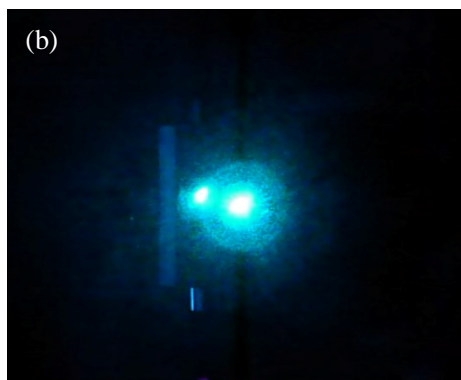
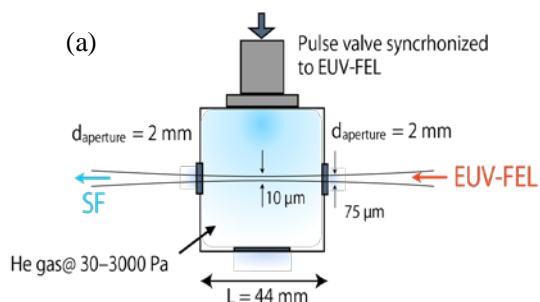


図 5: (a)ヘリウムガスセルの模式図と(b)EUV-FEL 下流からみたガスセル。

集光ミラーによって直径 $12 \mu\text{m}$ に集光される。その結果、光強度は最大 $3 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ に達する。実験に用いたガスセルの模式図を図 5(a)に示す。EUV-FEL の集光位置は、ガスセルの中心となるよう位置調整を行った。導入するガスの圧力を変えることで、平均原子間距離を調節した。ヘリウム原子密度を高めるために、一辺 44 mm の立方体ガスセル用い、EUV-FEL 光の 30 Hz に同期したパルスバルブからヘリウムガスをガスセル内に導入した。ガスセル内の EUV-FEL 照射時のガス圧は 300 Pa から 3000 Pa までの範囲と見積もられた。この圧力は、平均原子間距離 $11\sim 30 \text{ nm}$ に対応するので、波長 501.6 nm の超蛍光が起こる条件を十分に満足する励起原子密度となっている。

図 5(b)は、ヘリウムガスをガスセルに導入し、EUV-FEL 光を照射中のガスセルの様子を FEL 光に対して下流側から撮影した写真である。写真では分かり難いが、青緑色の光の輝きは、肉眼では直視できないほど眩しく、またビーム軸方向に 20 mrad 程度の指向性を有しており、通常の蛍光過程とは明らかに異なる現象であることが

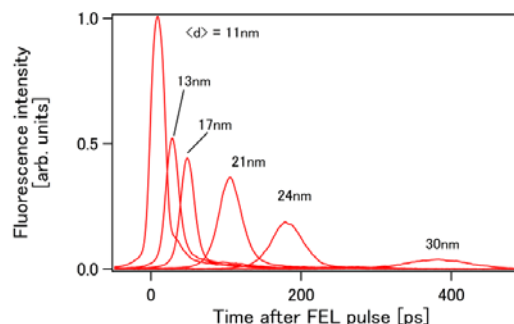


図 6: ストリークカメラによるヘリウム原子密度ごとの蛍光時間構造。$\langle d \rangle$は平均原子間距離を表す。

直ちに推察された。これが超蛍光であることを確認するために、遅延時間およびパルス幅の試料濃度依存性を浜松ホトニクス社製の超高速ストリークカメラ (FESCA200) を用いて計測した。その結果を図 6 に示す。He 原子の濃度が高くなるに従い、 t_{delay} は短くなり、 t_{width} も狭くなっている様子が見て取れる。今回の実験条件では、 t_{width} は長くても 100 ps 以下であり、自然放出率の 77 ns よりも遙かに短い。図 7 は、ストリークカメラで測定したスペクトルから抽出した、ピーク強度、 t_{delay} 、及び t_{width} を実験条件から見積もられた原子密度に対してプロットしたものである。データに対するフィッティングの結果 (各図中の実線)、ピーク強度は原子密度の二乗に比例し、 t_{delay} 及び t_{width} は原子密度に反比例しており、超蛍光の特徴に一致していることが明らかになった。

超蛍光では、励起原子密度を変化させることにより、遅延時間やパルス幅を制御することが出来る。また、高い単色性や指向性も有するので、EUV-FEL の本質的な弱点である、低い単色性や大きな強度変動を克服するパルス光源としての基盤技術となる可能性がある。例えば、励起 FEL 光源と同期した新しい短パルス光源として、二色 pump-probe 実験などへの応用が期待できる。

2.2 希ガス・クラスター

ヘリウム原子の実験では、EUV-FEL 光 (波長 53.7 nm) を用いて高密度の励起ヘリウム原子 ($\text{He } 1s3p$) を生成することにより、波長 501.6 nm の可視光の超蛍光を観測した。さらなる発展とし

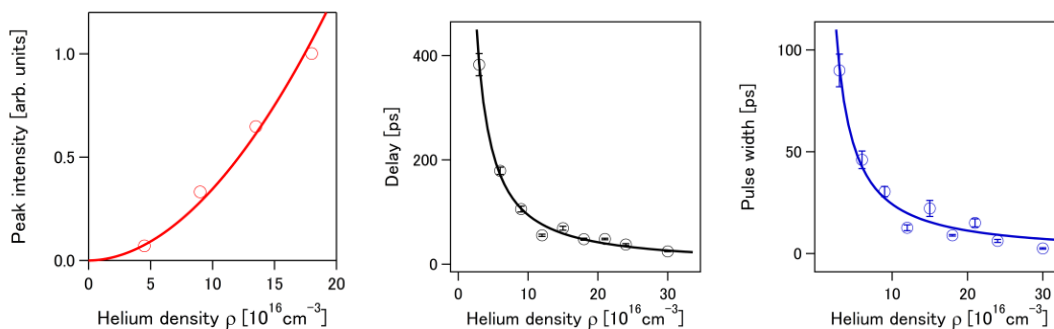


図 7: (a)蛍光ピーク強度, (b)遅延時間, (c)パルス時間幅のヘリウム原子密度依存性.

では, EUV 領域の超蛍光の観測や, 入射 EUV-FEL 光より短波長の超蛍光の観測が考えられる. EUV 領域の蛍光を観測する方法の一つに, 励起多価イオンの利用が挙げられる. 我々は, 希ガス・クラスターに EUV-FEL 光を照射することで, 励起多価イオンを生成し, EUV 領域の蛍光を観測した. その結果, 入射 EUV-FEL よりも短波長の蛍光の観測に成功した. ただし, ここで紹介する蛍光分光実験では, 励起原子密度が低いため, 超蛍光ではなく自然放出によるものである.

希ガス・クラスターは, 局所的にはバルクと同じ原子密度を持ち, クラスターサイズを変えることで表面原子の割合を変えることが可能なため, 物質と光の相互作用を知る上で重要な観測対象の一つであり, 活発に研究が行われてきた. これまでのイオン分光および電子分光による研究により, 高強度 EUV-FEL 光照射された希ガス・クラスターは, 多段の1光子吸収によるイオン化によってクラスター全体がイオン化し, ナノスケールのプラズマが形成されることが明らかになっている[14]. 局所的に固体と同じ原子密度をもつナノプラズマでは, 強い空間電荷効果のために, 電子エネルギー計測から励起原子のエネルギー準位の情報を得ることはできない.

孤立した希ガス原子に EUV-FEL を照射した場合, 多光子吸収によって多価イオンが主に生成されるが, 希ガス・クラスターの場合, 生成される解離イオンは, 主として一価イオンであることが知られている[15]. これは, ナノプラズマ内で生成した多価イオンが多数のプラズマ電子を再捕獲し, 強く中性化してからナノプラズマ化したクラスターから放出されていることを示唆している. そ

こで我々は, 励起多価イオンからの蛍光を測定することにより, 電子・イオン再結合による励起多価イオン生成過程に関する情報を得ることを目的として研究を行った.

実験は, ヘリウム原子に関する実験と同様に SCSS 試験加速器の EUV-FEL を利用して行われた. 観測対象は, アルゴン・クラスターである. アルゴン原子のイオン化ポテンシャル 15.6 eV よりも高い光子エネルギーである 24 eV(波長 51 nm)の EUV-FEL 光を利用した. EUV-FEL 光を集光照射されたクラスターからの蛍光は, 真空光学社製の平面結像型斜入射分光器を用いて計測された. この分光器の計測波長範囲は, 10 nm から 100 nm であり, 分解能は 300 程度であった. アルゴン・クラスターは, EUV-FEL 光と同期したパルスノズルを用いて, 超音速ジェット法により生成された. 平均クラスターサイズ $\langle N \rangle$ は, Hagena の経験則[16,17]に基づき, アルゴンガスの圧力を変えることで調節した.

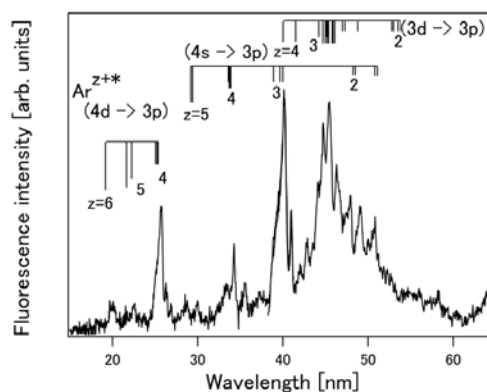


図 8: 極紫外自由電子レーザー照射されたアルゴン・クラスター Ar_N ($\langle N \rangle \sim 500$)からの蛍光スペクトル. レーザー波長 51 nm および光強度 3×10^{13} W/cm².

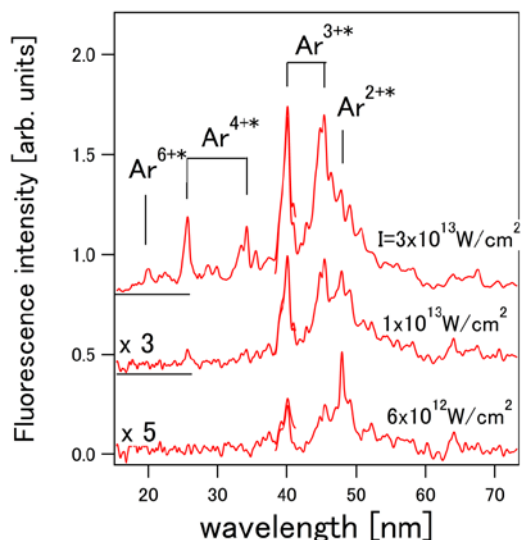


図 9: レーザー強度ごとのアルゴン・クラスター Ar_N ($\langle N \rangle \sim 500$) の蛍光スペクトル. レーザー波長 51 nm.

図 8 にアルゴン・クラスター Ar_N ($\langle N \rangle \sim 500$) の蛍光スペクトルを示す. 蛍光スペクトルには, 多くのピークが観測されており, それぞれのピークは, 励起多価イオンからの蛍光に対応している. ここで注目すべき点は, 入射波長 51 nm よりも短い波長の蛍光が観測されていることである. アルゴン・クラスターに EUV-FEL 光を集光照射することにより, 周波数上方変換が実現されているのである. 入射波長を 54 nm に変えた場合でも, ほぼ同じ構造の蛍光スペクトルが得られ, 顕著な入射波

長依存性は見られなかった. この結果は, 励起多価イオンは共鳴励起によって生成しているのではなく, 多価イオンがプラズマ電子を再捕獲することで励起多価イオンが生成していることを示していると考えられる.

観測された最も短い蛍光波長は 20 nm であり, NIST のデータテーブルに依れば, それは励起 6 価イオン Ar^{6+*} からの蛍光緩和に対応する. 同様の EUV-FEL 照射条件において, 孤立 Ar 原子が最大 6 価イオン[6]まで生成していることから, 20 nm の蛍光の観測は, クラスター内でも同様の多価イオンの生成を示唆していると考えられる.

入射波長 51 nm よりも短波長の蛍光が観測され, また多価イオンが多光子吸収によって生成されていることを考慮すれば, これらの蛍光強度は, 光強度に対して非線形な応答を示すはずである. 蛍光強度の EUV-FEL 光強度依存性の測定により非線形性を調べた結果を図 9 に示した. 図 9 を見れば明らかなように, 短波長の蛍光ほど非線形性が強い傾向がある. このことは, より価数の高い多価イオンを生成するためには, より多光子吸収が必要であることを示している.

図 10 に励起多価イオンが生成する過程の模式図を示す. 光照射された希ガス・クラスターは, 多段の 1 光子一価イオン化を繰り返すことにより, クラスター全体が多価イオン化する. 多価イオン化したクラスターイオンでは, 光イオン化によって

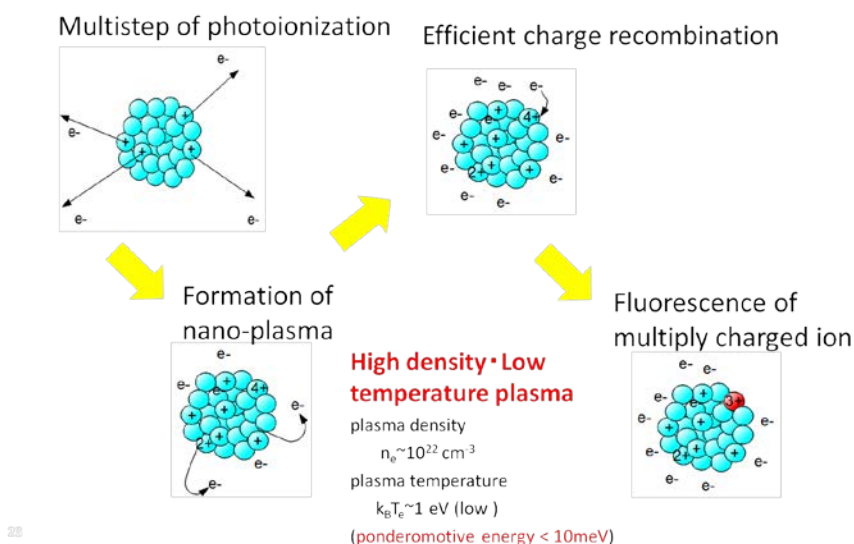


図 10: 極紫外自由電子レーザー光照射されたクラスターにおける励起多価イオン生成の概念図.

放出される光電子に対して次第に引力が強まって行くことになる。このため、クラスターのイオン化が進むにつれ、光電子の運動エネルギーが減少し、最終的には光電子はクラスターイオンから離れることができなくなる。その結果、光電子はナノスケールのプラズマ電子として振る舞うようになり、ナノサイズのプラズマが生成されることになる。このナノプラズマの生成は、赤外領域のレーザー照射の場合にも見られる現象であるが、EUV 領域の場合、レーザー電場によるプラズマ加熱過程が異なる。赤外光領域では、プラズマ電子は強いレーザー電場によって加速され、電子の運動エネルギーは keV に及ぶほど高くなり [18]、電子・イオン再衝突によって、ナノプラズマは光エネルギーを強く吸収する。一方、EUV より短波長領域では、波長の二乗に依存するプラズマ電子の平均運動エネルギーは、赤外に比べると何桁も小さくなる。事実、電子分光実験により、EUV 領域におけるプラズマ電子の運動エネルギーは、数 eV であると報告されている [19]。このように EUV 領域ではプラズマ加熱はほとんど寄与せず、クラスターの光吸収過程は弱く、またプラズマ電子の運動エネルギーも低い。そのため、ナノプラズマ化したクラスターの解離は、赤外領域で見られるようなクーロン爆発的な速い解離ではなく、数 10 ps に及ぶ膨張的な遅い解離 [20,21] であることが知られている。従って、EUV 領域でのプラズマ電子の運動においては、電子・電子、および電子・イオン間のクーロンポテンシャルが支配的であり、かつ遅い膨張的解離中にナノプラズマ内での電子・イオン再結合および蛍光緩和が効率的に起きると考えられる [22]。

3. おわりに

本稿では、我々が行ってきた EUV-FEL 照射による蛍光観測の中から、ヘリウム原子およびアルゴン・クラスターを観測対象とした実験結果について紹介した。蛍光波長程度の空間に1個より多くの励起原子が存在するような高密度のヘリウム原子集団では、協調的に蛍光緩和する可視光領域の超蛍光が観測された。この超蛍光は、励起原子密度に反比例した遅延時間を有し、自然放出の寿命よりもはるかに短いパルス幅である

ことが、ストリークカメラを用いた時分割測定により確認された。アルゴン・クラスターを EUV-FEL 光で照射した場合には、ナノプラズマ内の多価イオンと低エネルギープラズマ電子が再結合することにより、励起多価イオンが生成していることが EUV 蛍光分光法により確認された。これらの観測結果を踏まえて、今後、より高密度の希ガス・クラスター源を開発し、高密度の励起多価イオン集団を実現することにより、短波長領域での超蛍光の観測を実現したいと考えている。

超蛍光現象を発現させるためには、蛍光波長程度の空間に励起原子が一つより多く必要である。このため、蛍光波長が短くなればなるほど、より高密度な励起原子集団を実現しなければならない。従って、超蛍光の観測は、短波長になるほど技術的困難さが増大することになる。一方で、励起原子密度により遅延時間やパルス幅を制御可能であるという超蛍光の優れた特徴を活かした短波長、短パルス光の発生は、例えば、入射 FEL 光と同期した短波長・短パルス光を利用する pump-probe 実験を実現できる可能性がある。このような応用を視野に入れた光源開発に繋がる基盤技術研究としての重要性に鑑み、今後も短波長域における超蛍光の実現に向けて挑戦して行きたいと考えている。

謝辞

本稿で紹介した研究は、故永園充博士(理化学研究所)、James Harries 博士(原子力研究機構)、繁政英治准教授(分子科学研究所)との共同研究である。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] T. Shintake *et al.*, Nat. Photon. **2**, 555 (2008).
- [2] W. Ackermann *et al.*, Nat. Photon. **1**, 336 (2007).
- [3] P. Emma *et al.*, Nat. Photon. **4**, 641 (2010).
- [4] H. Tanaka *et al.*, Nat. Photon. **6**, 540 (2012).
- [5] L. Young *et al.*, Nature **466**, 56 (2010).
- [6] K. Motomura *et al.*, J. Phys. B **42**, 221003 (2009).
- [7] A. Pietzsch *et al.*, New J. Phys. **10**, 033004 (2008).

- [8] M. Nagasono *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 193603 (2011).
- [9] H. Iwayama *et al.*, Opt. Express **20**, 23174 (2012).
- [10] R. H. Dicke, Phys. Rev. **93**, 99 (1954).
- [11] R. Florian, L.O. Schwan and D. Schmid, Phys. Rev. **29**, 2709 (1984).
- [12] N. Skribanowitz, I. P. Herman, J. C. MacGillivray and M. S. Feld, Phys. Rev. Lett. **30**, 309 (1973).
- [13] E. Paradis, B. Barrett, A. Kumarakrishnan, R. Zhang and G. Raithel, Phys. Rev. A **77**, 043419 (2008).
- [14] C. Bostedt *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 133401 (2008).
- [15] H. Iwayama *et al.*, J. Phys. B **46**, 164019 (2013).
- [16] O. F. Hagen and W. Obert, J. Chem. Phys. **56**, 1793 (1972).
- [17] R. Karnbach, M. Joppien, J. Stapelfeldt, J. Wörmer and T. Möller, Rev. Sci. Instrum. **64**, 2838 (1993).
- [18] Y. L. Shao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 3343 (1996).
- [19] T. Laarmann *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 063402 (2005).
- [20] B. Schütte *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 253401 (2014).
- [21] H. Thomas *et al.*, Phys. Rev. Lett. **42**, 134018 (2009).
- [22] C. Jungreuhmayer, L. Ramunno, J. Zanghellini and T. Brabec, J. Phys. B **38**, 3029 (2005).

2014 年度 役員・委員会

会長

高橋正彦 (東北大学)

幹事

城丸春夫 (首都大学東京) [副会長]

加藤太治 (核融合科学研究所)

中井陽一 (理化学研究所)

渡邊 昇 (東北大学)

運営委員

東 俊行 (理化学研究所)

岡田邦宏 (上智大学)

小田切丈 (上智大学)

佐甲徳栄 (日本大学)

城丸春夫 (首都大学東京)

中村信行 (電気通信大学)

星野正光 (上智大学)

森下 亨 (電気通信大学)

市村 淳 (宇宙科学研究所)

鵜飼正敏 (東京農工大学)

加藤太治 (核融合科学研究所)

北島昌史 (東京工業大学)

田沼 肇 (首都大学東京)

長嶋泰之 (東京理科大学)

中井陽一 (理化学研究所)

渡邊 昇 (東北大学)

常置委員会

庶務委員会

委員長：渡邊 昇 (東北大学)

編集委員会

委員長：中井陽一 (理化学研究所)

行事委員会

委員長：加藤太治 (核融合科学研究所)

広報渉外委員会

委員長：城丸春夫 (首都大学東京)

顕彰委員会

委員長：鵜飼正敏 (東京農工大学)

編集委員 岸本直樹, 北島昌史, 富田成夫, 中井陽一,
彦坂泰正, 日高宏, 間嶋拓也, 森林健悟



しょうとつ 第12巻 第1号 (通巻62号)

Journal of Atomic Collision Research

©原子衝突学会 2015

<http://www.atomiccollision.jp/>

発行: 2015 年 1 月 15 日

配信: 原子衝突学会事務局 <acr-post@bunken.co.jp>