

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



THE ATOMIC COLLISION  
SOCIETY OF JAPAN

# 目次

シリーズ開始にあたり	足立純一	1
	(「しょうとつ」第8巻6号-2011年11月号-掲載)	
第1回 極紫外自由電子レーザーの原理と利用研究	永園充, 田中隆次, 矢橋牧名, 田中均, 石川哲也	4
	(「しょうとつ」第8巻6号-2011年11月号-掲載)	
第2回 極紫外自由電子レーザー場における原子のシングルショット光電子分光	彦坂泰正, 伏谷瑞穂, 菱川明栄	12
	(「しょうとつ」第9巻1号-2012年1月号-掲載)	
第3回 FELによるホロー原子固体の研究と今後の研究の展開	米田仁紀	18
	(「しょうとつ」第9巻2号-2011年3月号-掲載)	
第4回 生体高分子立体構造解明における原子分子物理の役割	森林健悟	24
	(「しょうとつ」第9巻4号-2011年7月号-掲載)	
第5回 XFELの時間構造測定を目指した多重内殻イオン化状態の研究	今村穰, 初井宇記	30
	(「しょうとつ」第10巻1号-2012年1月号-掲載)	
第6回 極紫外FEL光による希ガスクラスターの多光子イオン化と脱励起	永谷清信, 福澤宏宣, 上田潔, 八尾誠	36
	(「しょうとつ」第10巻4号-2012年7月号-掲載)	
第7回 極紫外光によるヘリウムの2光子電離における光電子角度分布	石川顕一, 上田潔	45
	(「しょうとつ」第10巻5号-2012年9月号-掲載)	
第8回 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	53
	(「しょうとつ」第12巻1号-2014年1月号-掲載)	

## 短波長自由電子レーザーによる原子分子光物理 シリーズ開始にあたり

足立純一

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光研究施設

adachij@post.kek.jp

平成 23 年 10 月 27 日原稿受付

原子分子光物理 (AMO) の分野では、レーザー・レーザーの出現により、様々な研究展開の道が拓かれた[1]. 例えば、強い単色レーザー光は、分光学的な分解能を著しく高めただけでなく、従来の光源では本質的に観測不可能である多光子遷移のような高次輻射過程の観測を可能にしている. そのような強いレーザー光が、さらに強く (高いパワー密度), さらに短波長になると、原子・分子・クラスターとそのレーザー光との相互作用により、どのような現象が引き起こされるのか、この分野の研究者の興味を惹きつけている[2]. しかし、紫外光よりも短波長になると、レーザー発振のための適切な光学媒体がほとんどなく、共振器を構成する光学素子も適当なものがほとんどない. そのため、従来型のレーザー技術では短波長化は不可能である.

現在、強い短波長レーザー光を生成されるためには、2 つの方法がある. その 1 つが、高強度レーザーを利用した高次高調波発生による方法である. もう 1 つは、加速器技術の最先端の粋を結集した自由電子レーザー (FEL) による方法であり、本解説シリーズで紹介する研究で用いられる手法である.

国家基幹技術の一つとして指定された X 線自由電子レーザー (XFEL) は、理化学研究所播磨研の大型放射光施設 (SPring-8) において開発・整備が進められている. 2011 年 6 月 7 日に波長 1.2 Å の X 線レーザーの発振に成功し、スタッフのさらなる努力で短波長記録を塗り替えて、7 月 13 日には 0.8 Å のレーザー光が得られ

ている [3]. その愛称は SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) と決定され、世界中の研究者に開かれた施設として、2011 年度内には供用運転を開始する予定である. 新たに手にした XFEL の利用により、物質科学における新しい研究展開が期待されている.

この SACLA の建設に先立ち、XFEL の実現に向けた新しい要素技術の実証のため、SPring-8 サイトに試験加速器 SCSS (SPring-8 Compact SASE[4] Source)[5] が建設されている. この SCSS では極端紫外光領域 FEL (EUV-FEL) の発振に成功しており、国内外の研究者からの公募課題による共同利用が行われている. 赤外・可視レーザーおよび放射光の利用の黎明期にて、AMO 分野がその光自体の特徴の測定や物質の相互作用の基礎過程の解明において重要な役割を果たしたように、初めて手にした EUV 領域の FEL の利用研究においても、AMO の分野で開拓的な成果が得られている.

そこで、『しょうとつ』誌において、短波長 FEL を用いた研究での成果 (計画) を紹介していただく記事を、AMO に近い分野で研究されている方に執筆していただくことを企画した. すでに、多くの注目すべき成果が挙げられているため、「短波長自由電子レーザーによる原子分子光物理」と題してシリーズ化し、複数の研究グループの方々に解説記事を執筆していただくことにした. 同様な解説は、すでに『放射光』第 23 巻 5 号 (2010) に特集されている. けれども、原子衝突研究協会の協会の皆さんと放射光学会の会員と

の重なりはさほど大きくないと判断し、また、その後も進展があるため、『しょうとつ』誌でもシリーズとして解説記事を執筆していただくことは意義があるだろう。

シリーズ第 1 回は、SCSS 試験加速器施設の利用連携チームのチームリーダーである永園氏に執筆を依頼した。FEL の発生原理について、そして、SCSS を利用した実験に興味のある方には、是非、今号のシリーズ第 1 回の永園氏の記事 [6] を読んでいただきたい。

短波長の領域において、物質科学研究に利用でき、波長可変性を有する実用光源は、シンクロトロン放射 (SR) による光がある。SR 光と比較すると、FEL の特徴として高輝度性・短パルス性・高い空間コヒーレント性が挙げられる。これらの特徴は、可視近赤外領域の先端のレーザー光の持つ特徴である。そのようなレーザーと短波長 FEL とを比べたとき、1 つの欠点として、時間コヒーレント性が欠如していることがある。これは、現状での FEL の発振には SASE 方式[4] を用いているためである。このことは、より精密な実験を進めていく上で障害となっている。

短波長 FEL 施設の世界的な現状を手短かに記述しておこう。短波長 FEL は現在、日本の SCSS [基本波 61-51 nm] の他に、ドイツの FLASH (Free-Electron Laser in Hamburg) [47-6.8 nm] [7]、米国の LCLS (Linac Coherent Light Source) [2.6-0.62 nm] [8] が稼働中である。基本波の波長域は、EUV から軟 X 線にわたる領域であり、互いに異なっている。SACLA の発振成功により、SCSS は“試験”加速器としての基本的な役割は終えている。しかし、EUV 領域における FEL は世界的に見て、現時点では唯一のものであり、今後も、EUV 領域のレーザー光源として、EUV 光と物質との相互作用素過程の研究、そして、その相互作用を用いた物質科学において、重要な役割を担っている。

それぞれの施設において、より短波長である Angstrom 領域の XFEL 発振が目指されている。日本では前述の SACLA が完成して調整中であり、米国では LCLS の加速器が延長され

2.5-1.2 Å を得るための調整が行われている。欧州では X 線領域での FEL を目指した、EuroFEL (European FEL) [9] が建設開始されている。また、韓国の Pohang (浦項) では 10 GeV の線形加速器を備えた PAL (Pohang Accelerator Laboratory) XFEL の建設が、この 4 月から始まっている [10]。そして、スイスの Paul Scherrer Institute においても、試験加速器の建設が始まっており、XFEL 施設 SwissFEL の 2016 年完成を目指して計画 [11] が進められている。

上述したように、現状の短波長 FEL の多くは SASE 方式であり、時間的コヒーレンス性の高い光ではない。これを克服するためには、FEL の発振波長に同調したレーザーを用い、FEL に種 (seed) を与える必要がある。すでに、それぞれの短波長 FEL 施設でシード型 FEL の実現に向けた研究開発が進められている。SCSS においても、EUV 領域でレーザーの高次高調波発生による光をシードとした FEL の発振に成功している [12]。イタリアの Elettra においては完全コヒーレンスを目指したシード型 FEL である FERMI (100-10 nm) [13] がすでに建設され、調整運転が始まっている。

短波長 FEL に関連した計画をもう 1 つ紹介しておく。異なる次世代放射光として、エネルギー回収型線形加速器 (ERL) が提案されている [14]。日本では高エネルギー加速器機構にて計画が進められており、その概念実証機であるコンパクト ERL (cERL) の建設が始まっている。実機の ERL は、展開される研究の詳細な検討、より現実的な建設経費の考慮が進められ、3 GeV ERL の設計が行われている。現在の計画では、2015 年に建設を開始し、2020 年に共同利用への公開を目指す計画となっている。その先の第 2 期計画として、共振器型 XFEL (XFEL-O) が提案されている。これは、完全結晶による X 線の Bragg 反射を利用して共振器を構成する方式 [15] の FEL である。この XFEL-O が実現すると、まさに桁違いの X 線が得られ、量子光学研究だけでなく、さらに新しい物質研究の世界が拓かれるだろう。

強いレーザー場中にある原子・分子系について、定常的電子状態の理論研究はすでに多くが行われている[1]。現実的には、パワー密度のピークに至るまでの過渡的な現象や、電離・解離による対象としている系の構成粒子の変化とその時間発展も、現象の理解に不可欠であり、実験的研究の対象としても非常に興味深い。今後、本解説シリーズが、協会の皆さんの EUV-FEL あるいは XFEL を用いた研究の理解に役立ち、興味をもたれた方の新規に参入していただける足がかりになれば幸いである。

### 参考文献および註・コメント

- [1] "Physics of Atoms and Molecules (2nd Ed.) Sec. 15", B.H. Bransden and C.J. Joachain (2003, Pearson Education).
- [2] K. Yamanouchi, *Science* **295**, 1659 (2002).
- [3] <http://xfel.riken.jp/>
- [4] Self Amplified Spontaneous Emission の略. 本号の永園氏の記事を参照のこと.
- [5] [http://xfeluser.riken.jp/scss/top\\_scss.html](http://xfeluser.riken.jp/scss/top_scss.html)

[6] 担当編集委員の個人的な印象では, "超蛍光" 現象は非常に興味深いものであり, 理研の広報サイト

[http://www.riken.jp/r-world/info/release/press/2011/111021\\_2/detail.html](http://www.riken.jp/r-world/info/release/press/2011/111021_2/detail.html)

に紹介されているように, "革新的" な研究が期待できる. 最初の報告が *Phys. Rev. Lett.* **107**, 193603 (2011) として発表されたばかりであり, 機会を改めて詳細を解説していただきたいと思っている.

[7] <http://flash.desy.de/>

[8] <http://lcls.slac.stanford.edu/>

[9] <http://www.xfel.eu/>

[10] インターネット上での情報を見つけられず, 建設開始については聞き伝えである.

[http://fel2010.maxlab.lu.se/FEL2010\\_proceedings/papers/mopc19.pdf](http://fel2010.maxlab.lu.se/FEL2010_proceedings/papers/mopc19.pdf)

[11] <http://www.psi.ch/swissfel/>

[12] *Opt. Express* **19**, 317 (2011);

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2011/01.html>

[13] <http://www.elettra.trieste.it/FERMI/>

[14] <http://pfwww.kek.jp/ERLOffice/>

[15] K-J. Kim *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 244802 (2008).