

より速く，より明るく

Keyword: X線自由電子レーザー

1. 自由電子レーザーの原理

反転分布状態の媒質からの誘導放出を利用したレーザー発振器は、1960年代の発明以来、主に赤外線や可視光領域のコヒーレント光源として発達を遂げてきた。近年ではレーザーの高次高調波を用いて紫外～軟X線領域のコヒーレント光も発生できるようになっている。しかし硬X線領域（エネルギー4 keV以上、波長3 Å以下）でのコヒーレント光源は、従来方式のレーザー技術では実現できていない。波長にかかわらずコヒーレント光を作成するもう1つの方法として、電子加速器のアンジュレータを光共振器の中に入れる自由電子レーザー（Free Electron Laser; FEL）が1970年代に提案された。アンジュレータとは、加速器の直線部に挿入し磁場等の外場を用いて電子を蛇行運動させる装置で、最近ではネオジウム磁石などの強力永久磁石を利用したものが主流となっている（図1）。外場が小さく蛇行運動の直線運動からの外れが大きい条件では、アンジュレータからはほぼ単色な光が得られる。この方式では共振器で単色光をつくりアンジュレータに導入することによって誘導放出を起こさせるが、硬X線領域では光共振器に必要な直入射での高反射率を与える物質がほとんど存在しない。このため硬X線領域の自由電子レーザーでは共振器の代わりに長いアンジュレータを置き、自己増幅自発放射（Self-Amplified Spontaneous Emission; SASE）を利用する方式が採用されている。この方式ではアンジュレータの中を相対論的速度で運動する電子ビームが比較的長時間、自らが放射した光と相互作用する。その結果、電子ビームには光の波長間隔で密度変調がかかる（マイクロバンチング）。このように密度変調された電子ビームがアンジュ

レータ内を蛇行運動すると、多数の電子が放射する光は前方方向で位相が揃い、コヒーレントな硬X線を得ることができる。¹⁾

2. 世界のX線自由電子レーザー施設

SASEを利用して硬X線領域での自由電子レーザー（XFEL）を実現するためには、線形加速器によって相対論的電子ビームを得る必要がある。最初のSASE型XFELの建設は、1990年代の中盤にアメリカのスタンフォード線形加速器センターで始まり、現在のLinac Coherent Light Source (LCLS) となった。²⁾ これに少し遅れて、ドイツのDESYで、極端紫外～軟X線領域のSASE型FEL (FLASH) が建設され、その後ヨーロッパ全体でのEuropean XFELプロジェクトとなった。LCLSとEuropean XFELでは、電子ビームが通る真空ダクトの外側に永久磁石を配置する形のアンジュレータが採択されている。このためアンジュレータの磁場周期長が比較的大きくなり、X線領域のコヒーレント光を得るためには電子ビームのエネルギーを高くする必要があり、LCLSは電子エネルギー14 GeVで、最高レーザー光エネルギーは当初8 keV、その後10 keVに設定されている。European XFELは電子エネルギー20 GeVで、最高レーザー光エネルギーは当初18 keV、その後24 keVに変更された。

日本では2001年にSPring-8で、真空ダクトの内側にアンジュレータを置いたSASE型XFELの開発が始まり、後のSACLA（図2）となった。³⁾ 真空封止型アンジュレータを用いると磁場周期を短くすることができ、その結果、電子ビームのエネルギーが比較的小さくて済む。したがって線形加速器が短くなり施設全体が小型化できる。加速勾配の大きなCバンド加速管の採用により、施設のさらなる

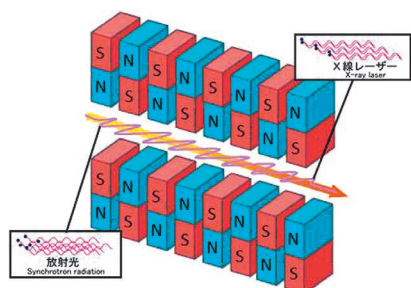


図1 アンジュレータの交差的磁場をつくる永久磁石列中での電子の正弦的な進路（ピンク波線）を示す。赤色波線は放出された光子。異なる電子はアンジュレータに入ると最初はコヒーレントでないX線放射光を出す（左下）。自己増幅自発放射では、電子は放射と相互作用してマイクロバンチに自己整列し（右上）。これが同期して蛇行運動することによりコヒーレントなX線レーザーパルスを生成する。



図2 SACLAのアンジュレータ。右側が最初に設置されたBL3。左側が2014年に設置されたBL2。

小型化が可能になった。2015年11月時点で、SACLAはアメリカLCLSとともに世界中で唯二つだけ動いている硬X線FELである。SACLAによってコンパクトXFELへの道が拓かれ、超大国でなくても一国で建設・運営が可能になった。スイス、韓国がXFEL建設に乗り出し、2016-2017年にかけて稼働を開始する。一方でEuropean XFELも2017年から稼働する予定であり、今から2年後には5施設が入り乱れての大競争時代に突入する。⁴⁾

3. X線自由電子レーザーが拓く研究分野

XFELは従来のX線光源を用いた回折・分光・イメージングなどを、より短時間でより高感度に検出することができる。XFELの最大の特徴は高輝度・短パルスのX線源であることで、例えばSACLAからはエネルギー10 keVのX線がパルスエネルギー500 μ J、パルス幅5フェムト秒で得られる。これほど高強度のX線を照射すると多くの場合試料は壊れてしまうが、パルス幅が試料の破壊にかかる時間よりもはるかに短いため、壊れる前の状態を検出することができる。これは“Diffract before Destroy”と呼ばれ、XFELを用いた計測の基本となるものである。タンパク質などの結晶構造解析では、放射光への長時間露光による試料損傷が無視できない場合もあるが、そのような試料でもXFELの単一ショット計測により構造解析が可能になる。同じ原理により、生物試料がX線による放射線損傷を受ける前の状態を検出することも可能である。短い波長に起因するすぐれた空間分解能(数nm)、高い透過力を活かして、生きた状態での細胞のX線散乱イメージングも行われている。

フェムト秒の時間分解能での観察は、超伝導や超流動転移にも応用され、それらのダイナミクスを捉えている。LCLSでは、液体ヘリウム4の液滴を真空中に吹き出し、断熱膨張させることによって超流動転移温度以下に下げていく過程をコヒーレントX線散乱イメージングによって観察した。液滴が超流動状態になると、角運動量は量子化された渦糸に変換される。液体ヘリウムにXeをドープして観察すると、渦糸が規則的な格子に配列されていることが明らかになった。液滴の形状は、回転する液体ヘリウムの古典的安定限界を超えており、また渦糸の密度は、今までにより大きな系で測られたものより5桁も大きかった。

化学反応によって溶液中の原子と原子が結合して新しい分子が生成する瞬間を直接「観る」ことも可能になった。ある種の金錯体では溶液中で金-金イオン間に緩い引力が働いているが、光を当てると分子同士が結合し新しい分子が生成される。X線自由電子レーザーでこの過程を観察すると、結合が形成される金イオン間の構造の超高速変化が

明らかになった。光を当てる前の金錯体の集合体では金イオンがジグザグに並んだ構造を持ち、引力が弱いために不安定に揺れている。ところが光を当てた瞬間に金イオン間の距離は急速に縮まって強固な直線構造をとることが分かった。SACLAで行われたこの研究は、分子の形成を直接観察した初めての例である。

XFEL自体は波長が比較的不安定であるが、XFELを励起光源として用いることにより、波長が安定な硬X線「原子レーザー」が実現する。XFELパルスで原子中の内殻電子を励起してX線域のAmplified Spontaneous Emission (ASE)を観測するだけでなく、最初のパルスで内殻励起し、2番目のパルスをASEのエネルギーに合わせることでASEの増幅を観測された。⁵⁾ 2つのパルスはアンジュレータの途中にシケインを置いてつくり、その前後で磁場強度を変えて互いに異なるエネルギーとした。ASEの増幅は原子の内殻準位に反転分布が実現していることを示しており、次のステップのX線コヒーレント光源に繋がる。

4. これからのX線自由電子レーザー

SASE型XFELはノイズを増幅していくため、そのままでは得られる光はマルチモードとなる。赤外～可視領域のレーザー発振器のような、よりコヒーレンスの高いシングルモードのX線を得るために、SASE光源の長いアンジュレータの途中に分光器を入れて単色光の「種(シード)光」をつくり、後方のアンジュレータでこれを増幅するself-seedingが提案された。この方式の困難は、分光器で単色化されたX線パルスと、電子バンチを時間的に重ね合わせる場所にある。

SACLAによってXFELは小型化の第一歩を踏み出したが、レーザープラズマ航跡場加速や、誘電体加速などの新技術によって線形加速器はさらに小さくなる可能性がある。アンジュレータの短周期化も研究開発が進んでおり将来さらにコンパクトなXFELに繋がっていく。このような、レーザー技術と加速器技術の組み合わせは、全く新しいタイプのコヒーレントX線源を生み出す可能性がある。

参考文献

- 1) 石川哲也: パリティ **29** (2014) 6.
- 2) P. Emma, *et al.*: Nature Photonics **4** (2010) 641.
- 3) T. Ishikawa, *et al.*: Nature Photonics **6** (2012) 540.
- 4) M. M. Waldrop: Nature **505** (2014) 604.
- 5) H. Yoneda, *et al.*: Nature **524** (2015) 446.

石川哲也 (理化学研究所放射光科学総合研究センター
ishikawa@spring8.or.jp)

(2015年12月6日原稿受付)