

LCLS ビームラインの現状と展望

佐藤 堯洋(Linac Coherent Light Source, SLAC National Accelerator Laboratory)

Linac Coherent Light Source

Linac Coherent Light Source(LCLS)は、世界で初めてオンゲストローム領域の波長の発振を達成した X 線自由電子レーザー施設である[1]。SLAC 国立加速器研究所内に建設された LCLS は 2009 年に硬 X 線領域の SASE(Self Amplified Spontaneous Emission)発振を達成後、ユーザー供用が開始された。250 eV から 12.8 keV の光子エネルギー領域において、サブ 10~50 フェムト秒、ミリジュールクラスのパルスエネルギーの X 線を最大 120Hz で発生することができる。電子銃、加速器部、アンジュレータ部、および NEH(Near Experimental Hall) および、200m 程度離れた下流側に位置する FEH(Far Experimental Hall) の 2 つ実験ホールから構成されている。実験ホールは上流側から AMO(Atomic, Molecular & Optical Science)[2], SXR(Soft X-ray Material Science)[3], XPP(X-ray Pump Probe)[4], XCS(X-ray correlation spectroscopy)[5], MFX(Macromolecular Femtosecond Crystallography), CXI(Coherent X-ray Imaging)[6], そして MEC(Matter Extreme Condition)[7]の 7 つの実験ステーションから構成される。

実験ステーション

NEH に設置された AMO および SXR はいわゆる軟 X 線領域の波長を対象としており、NEH の XPP および、FEH に設置された 4 つの実験ステーションは硬 X 線領域の波長の使用を前提としている。筆者は HXR(Hard X-ray Department)に所属している。HXR は、MEC 以外の硬 X 線領域の実験ステーションを担当し、気相、溶液、固体などの試料をテラヘルツから紫外領域のレーザー光源によって励起し、その高速応答を回折や分光で計測する XPP、小角散乱や X 線光子相関計測を主目的とした XCS、主に結晶たんぱくなどの生物系試料を大気環境下で計測することを対象とした MFX、真空雰囲気、大型検出器を用いたイメージングを主目的とした CXI のオペレーションを担当している。軟 X 領域の実験ステーションおよび MEC については、それぞれ参考文献を参照されたい。各実験ステーションには、パルスエネルギーやタイミングなどを計測する共通仕様のビーム診断系、ミラーやレンズなどの光学素子に加えて、XPP には物質励起用の光学レーザー、X 線回折計、ロボットアーム、XCS には小角散乱計測用の大型の検出器アームや、X 線ポンププローブ計測用の X 線分割遅延光学系などが備えられており、6 軸回折計や、溶液散乱用チャンバー、光電子分光用チャンバー、ヘリウムボックスを始めとした計測装置が用途に応じて設置される。

運転モード

LCLS は日本の SACLA や Euro XFEL、韓国の PAL と同様に、SASE(Self Amplified Spontaneous Emission)方式と呼ばれるショットノイズに起因する種光を増幅させる。そのため、それぞれのパルスがもつ時間、周波数構造は、統計的な分布をもつスパイク構造である。典型的な SASE 光はマルチモード、パルス幅は 30~40 fs 程度であるが、ダイヤモンドの回折を利用して単色性の向上を目的としたセルフシード、軟 X 線領域において外部からレーザー導入によって電子バンチにモジュレーションを誘起して、サブフェムトパルス発生する XLEAP、電子バンチの非線形圧縮によるサブフェ

ムト秒パルス、ダブル電子バンチモードによる 2 色 X 線モードなど、実験の目的に応じた様々な運転モードが実現している。

LCLS は 線形加速器ベースの FEL 光源であるため、他の XFEL 施設と同様に、原理的には一加速器に対して、1 ビームライン 1 ユーザーであり、ビームタイムの配分の採択率はこれまで高いとは言えなかった。近年では、1 ユーザー(1 エンドステーション)が X 線を占有する運転モードに加えて、硬 X 線領域において、薄いダイヤモンドを第一結晶に使用した Large Offset Double Crystal Monochromator (LODCM)[8, 9]の(1 1 1)反射によって、30 eV 程度のバンド幅を持つ XFEL 光の一部である約 0.5 eV を分割し、XPP や XCS などのユーザー実験に供用し、残りの部分を透過させて、CXI や MFX などの他のユーザー実験に供用する Multiplex と呼ばれるビームラインオペレーションが供用されている。現在 LODCM は XPP と、NEH と FEH をつなぐトンネル内の 2 カ所に設置され、3 グループ(2 グループが単色光を利用、1 グループがいわゆるピンクビームを使用)が同時に実験を遂行することが可能となっている。また、CXI では CDI タイプの実験に使用されたダイレクト X 線を、検出器の中心を通過させ、再度 Be レンズで再度集光、直列に接続したチャンバー内のサンプルに照射するという並行測定が可能である。Multiplex により同波長の使用という前提はあるものの、最大 4 グループ(XPP、XCS、CXI x 2)が同時に X 線レーザーを利用して実験を遂行することができ、ビームタイムの大幅な増加を実現した。

今後の展望

今後の予定(2017 年 12 月現在)であるが、2018 年 12 月までユーザー供用(Run 17)が予定されており、12 月から 1 年間にわたるシャットダウンの後、超伝導加速器および硬 X 線、軟 X 線それぞれに可変ギャップアンジュレータが導入される。その後、LCLS-II のコミッショニングが予定されており 軟 X 線領域(~2 keV)では、MHz・CW タイプの高繰り返しオペレーションが、硬 X 線領域では、既存の加速器と新しい可変ギャップ型のアンジュレータを組み合わせることによって、25 keV までの波長領域の拡大が予定されている。新しい加速器とアンジュレータの導入は、硬 X 線および軟 X 線の同時オペレーションを可能とし、利用機会の増大が期待される。これらの情報は随時 LCLS の web サイトにおいて更新されているので興味がある方は参照頂きたい。

- [1] P. Emma et al., Nat. Photonics 4, 641–647 (2010).
- [2] K. Ferguson et al., Synchrotron Rad. 22, 492-497 (2015).
- [3] G. Dakovski et al., J. Synchrotron Rad. 22, 498-502 (2015).
- [4] M. Chollet et al., J. Synchrotron Rad. 22, 503-507 (2015).
- [5] R. Alonso-Mori et al., J. Synchrotron Rad. 22, 508-513 (2015).
- [6] M. Liang et al., J. Synchrotron Rad. 22, 514-519 (2015).
- [7] B. Nagler et al., J. Synchrotron Rad. 22, 520-525 (2015).
- [8] D. Zhu et al., Rev. Sci. Instrum. 85, 063106 (2014).
- [9] Y. Feng et al., J. Synchrotron Rad. 22, 626-633 (2015).