

VUVX2023に参加して

東北大学大学院理学研究科 中山耕輔

2023年7月3日から7日までブラジルのカンピーナス州立大にて「41st International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX 2023)」が開催されました。本会議は真空紫外線(VUV)の国際会議とX線の国際会議が統合して生まれた国際会議とのことで、これまで3年毎に開催されていたものの、COVID-19の世界的流行を受けて1年延期され、今回は4年ぶりの開催となったようです。私はVUVを用いた角度分解光電子分光(ARPES)の結果について講演の機会をいただき、初めて参加してきました。参加者は欧米とブラジルを中心とする280名ほどだったと聞きました。このうち日本からの参加者はおそらく5-6名ほどで、前回のアメリカで開催されたVUVX2019に比べて激減したそうです。会場へのアクセスが容易ではないために参加を見送った方が多かったのではないのでしょうか。実際、日本から航空機を乗り継いで丸一日以上かけてサンパウロにあるグアルーリョス国際空港に降り立った後、さらにバスとタクシーを乗り継ぐこと2時間半ほどでようやく会場へ辿り着くという長旅で、私もかなり疲れを感じるようになりました。

会議ではVUVから硬X線に亘る広い波長領域の光を題材として、放射光やレーザーといった光源の開発、新しい計測装置・手法、及びそれらを用いた基礎・応用研究など、多岐にわたるテーマについて活発な議論が行われていました。その中で最も関心を集めたテーマの一つがブラジルの新型放射光施設Sirius(図1)です。会議の初日は、Siriusを運営するBrazilian Synchrotron Light LaboratoryのディレクターHarry Westfahl Jr.氏によるplenary talkで始まり、夕



図1 Siriusの外観

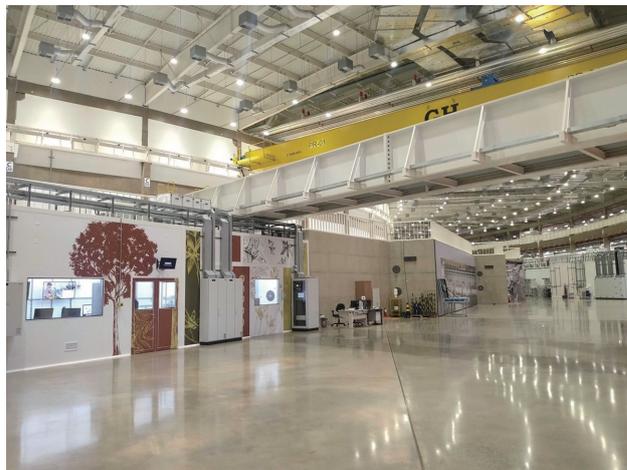


図2 Siriusの実験ホール内

方にはSiriusの施設見学が実施されました。Siriusは会場であるカンピーナス州立大から車で15分ほどの所に位置しており、グアルーリョス空港からであれば3時間弱の時間を要することになります。建設は2015年に着工し、2018年に完成した。建物の正面玄関は全面ガラス張りのモダンな印象で、ロビーは広い空間を活かした開放的な作りとなっていました。放射光施設としては、3 GeVの加速器と周長およそ500 mの蓄積リングに14本のビームライン(内7本がアンジュレータ)を備え、0.25 nm radという低エミッタンスの実現を目指した設計が大きな特長ようです。2020年に放射光を用いた初めての実験が行われ、現在は半数近くのビームラインで共同利用実験が開始されているとのことです。ロビーに表示されたリングの運転状況から、見学直前までユーザーによる実験が行われていた様子うかがえました。実験ホールに入っすぐ目に飛び込んできたのは、実験ハッチに大きく描かれた動物や植物の絵です(図2)。各ビームラインの名称も南米の動植物を表すポルトガル語となっており、ブラジルらしさをうまく取り入れているように感じました。例えば今回案内してもらったビームラインの一つ、EMAは、Extreme condition Methods of Analysisの頭文字を組み合わせた単語で、ポルトガル語でダチョウのような姿をしたブラジル最大の鳥を意味するそうです。このビームラインでは高圧(最大1000 GPa)、高温(最高8000 K)、低温(最低0.5 K)、強磁場(最大11 T)を自在に組み合わせた多重極限環境の下、吸収分光やX線回折、X線散乱などの測定を行うことが可能で、圧力-温度-磁場相図の未踏領域における新規現象の探索・研究を目指しているとのことです。他にもいくつか案内してもらったビームラインの中には、ブラジルの初代放射光施設から移設した年季の入ったエンドステーションを利用している所もありましたが、現在まさに建設が進

められている新しい装置も多数あり、またビームラインスタッフから溢れる熱量も感じられ、今後の進展に大いに興味が湧いた施設見学となりました。なお、運転モードはリング蓄積電流 350 mA でのトップアップを最終的に予定しているものの、現状は 100 mA に抑えた運転となっていました。これは主に RF 装置の性能によって制限されており、一時的に設置された常伝導 RF 装置から最終型となる超伝導 RF 装置への更新などを経てフルスペックでの稼働を目指す計画だそうです。そのため、Sirius の性能を最大限に活かした研究の実現はもう少し先ようです。

会議二日目の私自身の講演では、Photon Factory BL-28A のマイクロ ARPES 装置（および UVSOR BL5U, 6U）を活用し、カゴメ格子を持つ新型超伝導体 CsV₃Sb₅ の電子構造をイメージングした成果を中心に話しました。会期中に催された計 30 セッションの内、ARPES が主題のセッションが 3 つあり、同業者が比較的多かったようで、専門的な質問も受けるなど良い刺激となりました。会議初日に話を戻すと、実験ホール見学後は Sirius のロビー脇にある広いスペースでカクテルパーティが催され、私にとってはこれまでお会いする機会の無かった国内外の放射光施設の方々と交流でき、有意義な時間となりました。また、ブラジルの代表的な料理であるコシーニャ（先の尖った特徴的な形をしたコロッケのような食べ物）やポンデケージョ（チーズパン）も提供され、美味しくいただきました。ブラジルでの食事は、バンケットで食したシュラスコ（ブラジル版のバーベキュー）やカイピリーニャ（サトウキビから作った蒸留酒にフルーツをふんだんに入れたカクテル）、ランチでのフェイジョアータ（豆と肉の煮込み料理）など、どれも口に合い、大いに満喫することができました。また、訪問前は治安の悪さを懸念していましたが、今回滞在した地域は大学周辺ということもあってか、危険な状況に遭遇することなく過ごせました（とは言え、ほとんどの家に電気柵などの防犯対策が施されており、用心は必要そうでした）。総じて、アクセスに難があったことを除けば充実した出張になりそうだったので、帰国する前日くらいに蚊に足を刺され、歩くのも辛いほど腫れてしまい、感染症に罹らないか暫く心配しながら生活することになったのは苦い思い出となりました。

今回の VUVX は 2026 年にスウェーデンのウプサラで開催される予定だそうです。ウプサラには 15 世紀に創設された北欧最古のウプサラ大学があり、私が専門とする光電子分光実験の高分解能技術を開発して後にノーベル物理学賞を受賞した Kai Siegbahn 氏が長年研究されていた地です。機会があれば次回 VUVX にも参加し、この歴史ある街を訪れてみたいです。

FLS2023 報告

加速器第六研究系 山本尚人

はじめに

2023 年 8 月 27 日から 9 月 1 日までの約一週間、スイスの Lucerne（ルツェルン市）にて the 67th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources (FLS 2023) が開催された。ホストはスイスの Paul Scherrer Institute (PSI)、Workshop chair は Hans-H. Braun 氏が務めた。Hans-H. Braun 氏は SLS 2.0 のプロジェクトリーダーでもある。

FLS Workshop は将来の光源加速器を対象としたビームダイナミクスワークショップで、過去には 1996 年に Grenoble（仏）、1999 年に Argonne（米）、2002 年に兵庫（日本）、2006 年に Hamburg（独）、2010 年に Menlo Park（米）、2012 年に Newport News（米）、2018 年に上海（中国）で開催されてきた。

FLS 2023 は当初 2021 年の開催を予定し準備されてきたが、Hans-H. Braun 氏の対面開催への強い意思の元、2 回の延期の末に現地開催に漕ぎ着けたものである。その強い意志は、以下の宣言文にも表されている。“In the spirit of the FLS workshop series, FLS 2023 will bring together international scientists to exchange ideas and discuss best practices about accelerator based light sources, their new development trends and related key technologies.”

開催地と会場の情報

FLS 2023 が開催されたルツェルン市はチューリヒ・クローテン国際空港から南へ約 60 km、鉄道で約 1 時間 30 分に位置する。ルツェルン市は 1178 年に誕生した歴史ある都市であり、カペル橋と呼ばれる 14 世紀に作られた木造の橋が現在も維持され、使用されている。また、ルツェルン音楽祭が毎年開催されることでも知られている。

Workshop 会場はルツェルン鉄道駅から 2.6 km 離れた交通博物館 (Verkehrshaus der Schweiz) 付属の会議場に設けられた。鉄道駅及び交通博物館は共にルツェルン湖畔に存在し、鉄道駅からの移動の際は左手側にカペル橋や旧市街を、右手側にはリギ山 (1798 m) からピラトゥス山 (2132 m) まで連なるルツェルン湖を囲む独特な氷河地形を楽しむことができる。私が歩いた際は天候に恵まれず山々の景色は雲で隠されていたが、ルツェルン湖で羽を休める鴨や白鳥などの水鳥、出航を待つヨットやフェリー、ペタンクと呼ばれる直径 8 cm ほどの金属球を投げて転がす年配の男性グループ、湖を眺めて等間隔に並ぶカップル、にわか雨に慌てて避難するカップル達を眺めることができた。

会場は市街地から少し離れているため、会期中の昼食は交通博物館の食堂を観光客に混じって利用した。提供されるメニューは芋・パスタ・ピザ・米・ソーセージ・豚・チキン・野菜バーと豊富で、数日の滞在期間では飽きることはなかった。また、夕食はルツェルン市街のレストランに足を運び、スイスやルツェルンの名物料理を味わった。会

期の真ん中となる水曜日には Conference Dinner が催された。Dinner はルツェルン湖を周遊するフェリー内で約 4 時間にわたり行われた。フェリー上では常にグラスを満たす赤・白ワインの合間に 3 皿の料理、湖面・山肌が徐々に夕陽に照らされオレンジから赤へと輝く様子、さらに終盤には夜の湖面に浮かぶルツェルン市街の夜景を楽しむことができた。

ワークショップの概要

Workshop Program は、初日（月曜日）と 3 日目（水曜日）の午前中に設けられたプレナリーセッションの他、A: Linac-based Light sources, B: Storage Ring Light Sources, C: Compact Light Sources, D: Key Technologies の 4 つの Working Group (WG) に分けて構成されていた。発表申込数は、WG: A, B, C, D でそれぞれ 63, 45, 21, 29 で総数 158 件であった。参加人数は全部で 200 名程であったと思われる。参加者の所属機関はヨーロッパ地域が最も多く、次いでアメリカ地域、中国と台湾からの参加者も少なくなかった。日本からの参加は 4 名（内、KEK 2 名）と少なかった。日本加速器学会年会と会期が重なったこと、円安による旅費の高騰などがその理由だと思われる。初日に撮影された集合写真を図 1 に示す。

Workshop の準備・運営に際し、各 WG にはそれぞれ 3-6 名の Group Convener が割り当てられ、プログラム作成・セッション運営などを一任する形が採用された。そのため、各 WG に応じてセッション運営に対する温度差を感じられた。具体的には、WG: A, D ではセッションの最後に“Discussion”の時間が設けられ、図 2 で示すように Convener と発表者がステージ上で共通のテーマに対し課題や将来展望について熱い議論を行っていた。これに対し WG: B では、Convener のうち 1 人しか Workshop 会場に表れず、“Discussion”の時間は長めのコーヒブレイクにあてられた。

また、最終日（金曜日）にはサマリーとして月曜日から木曜日までの各 WG セッションで議論された内容が Convener により紹介された。前述したように WG: B では Convener 1 名のみが参加したため、各セッション座長が発表と質疑の内容を一旦まとめ、その資料を木曜日夜までに Convener に提出、その後 Convener が全体としての報告資



図 2 WG: A のあるセッションでの“Discussion”の様子。講演者と Group Convener が壇上集まり、聴衆とともに発表内容や関連項目について熱い議論を繰り広げた。

料を準備する形となった。私自身も木曜午後の WG: B セッションで座長を務めたため、セッション終了後に急ぎ資料を準備する必要に迫られた。

講演内容の紹介

以下、プレナリーセッションの講演について、幾つか取り上げて紹介する。個々の発表資料やプロシーディングスは既に公開されているため、興味のある方は <https://fls2023.vrws.de/index.html> を参考にして頂きたい。

Workshop の最初の講演は、INFN の R. Assmann 氏によるプラズマ加速のレビューと EuPRAXIA の紹介から始まった。EuPRAXIA は“European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications”の略でヨーロッパ内に、プラズマ加速技術を利用した複数の実験施設を建設しようという計画である。施設では、10-100 Hz の繰り返しで電子 (0.1-5 GeV, 30 pC)、陽電子 (0.5-10 MeV)、レーザー (100 J, 50 fs)、X線 (1-110 keV)、FEL 光 (0.2-36 nm) を供給することを計画している。現在、Beam-Driven plasma の施設がイタリアの Frascati に建設されることが決まっており、Laser-Driven plasma についてはサイト選定中である。人件費を含めた建設コストは前者が 174 M€, 後者が 178 M€であり、前者の 80%を既に確保済みとのことであった。



図 1 初日に撮影された参加者らの集合写真。予定ではルツェルン湖を背景に撮影する予定であったが、雨が降っていたためメイン会場での撮影となった。

ESRF の J. Chavanne による講演では、将来光源での永久磁石運用についてレビューがあり、ESRF での経験も合わせて報告された。講演前半では要素技術の説明があり、磁石材料としては温度安定性と放射線耐性の面から $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ が有望であること、Fe-Ni 合金を用いた磁場補正の方法が紹介された。また、ESRF でのアセンブリ時の苦勞や工夫についての報告もあった。ESRF では EBS アップグレードにおいて偏向磁石に永久磁石を採用したことで他の電磁石も合わせた磁石全体の運転電力が半分になり、日々の電源・冷却水メンテナンスからも解放されたとのことである。また、2 年間にわたる運転期間において減磁の影響は観測されていないとのことであった。次に、他施設での動向が示され、SLS 2.0 では通常の偏向磁石に加え機能結合型、逆偏向磁石でも永久磁石をもちいて 60%、SOLEIL-II では加えて 4 極磁石にも永久磁石を採用することで 78% の電力削減を実現できる見込みとのことであった。講演後半には課題として、磁石間のクロストークの問題、長期安定性に対する展望、セプトム磁石開発について議論があった。

同じく ESRF の P. Raimondi は “Future of the Multi-bend Achromat” とのタイトルで講演を行った。講演の序盤において、回折限界光源リングとして求められる条件として、“5-15 pm のエミッタンスの丸型電子ビーム”、“X線とマッチングした電子ビーム”、“Touschek 寿命 10 時間以上、真空寿命 100 時間以上”、“入射部で水平方向に 10 mm を越えるダイナミックアパーチャ”、“水平垂直ギャップ 4-6 mm の真空封止挿入光源の利用を許容する入射システム”を挙げた。また、この条件を満たすことで、“入射条件の緩和と安定化”、“マルチバンチ、タイミングモード、ハイブリッドモードの両立”、“余裕を持った放射線管理”、“機器の放射化、挿入光源へ放射線損傷の軽減”、“運転コストと電力の軽減”が可能となると述べた。講演の後半ではこれらを満たすには ESRF-EBS で採用された H7BA よりも多セル化した際に破綻しない H6BA もしくはこれを 2 つ合わせた H11BA ラティスが最適であるとし、実際に SLAC で次期光源として検討に挙げられている SSRLX (587 m, 4 GeV, 44H6BA, 60-80 pmrad), SDLS (2 km, 5 GeV, 72H6BA, 8 pmrad round beam) などについて紹介があった。また、講演の最後には ESRF を EBS にアップグレードした効果として、ビームラインで得られるフラックスとしても挿入光源ラインで 30 倍、偏向電磁石ラインで 5 倍のゲインが確認されているとの報告があった。

その他のプレナリートークを以下、一発表一文で紹介する。ナノ構造を利用した Compact Light source (C. Roques-Carnes; Stanford Univ.), EuXFEL での 25 keV を越える硬 X線生成 (Y. Chen; DESY), Storage Ring Based Steady State Microbunching (A. Chao; Tsinghua Univ.), 低エミッタンス光源におけるバンチ伸長用高調波空洞のレビュー (F. Cullinan; MAX IV), Linac-based FEL の現状と将来の発展を支える様々な技術のレビュー (S. Reiche; PSI), Cavity-Based FEL (XRAFEL, XFEL) のレビューと展望 (Z. Huang; SLAC), ANL での CompactXFEL を目指した新提

案と R&D の話 (J. Byrd; ANL), Liquid MetalJet を用いた小型 X線源の話 (M. Boin; HZB)。

最後に

以上、FLS 2023 について簡単に報告させて頂いた。私は前回の FLS 2018 に続き 2 回目の FLS Workshop 参加であった。個人的な感想であるが、Workshop 全体としては前回の FLS 2018 の方が盛り上がっていたように感じた。特に WG: B の Storage Ring Light Sources に関してはその温度差が大きいように感じた。

2018 年当時、エミッタンス 1 nmrad を大きく下回る極低エミッタンスリングとして MAX IV (スウェーデン) のみが稼働していたのに対し、この 5 年間に状況は大きく変わった。既に最先端の極低エミッタンスラティスを採用した ESRF-EBS (仏), SIRIUS (ブラジル) が稼働しており、HEPS (中国), APS-U (米) が建設終盤にかけコミッション開始を目前 (2024 年 2 月頃予定) に控えている。また、SLS 2.0 (スイス), SOLEIL-II (仏), ELETTRA 2.0 (伊), DIAMOND II (英), ALS-U (米) なども詳細設計を固め建設開始、もしくは建設予算の措置決定を待っている状況である。このように目前に “Future light source” を控えている施設が多く、さらに先の “Future” を支える新たなアイデアや技術については、議論の準備が整っていない状況にあるのではと思う。ただし、幾つか種はまかれていたように感じる。

現在、放射光実験施設 (Photon Factory) では次の段階の “Future light source” を検討している段階である。こちらも現状では各国の専門家との活発な議論に耐えうる状況とは言い難いが、徐々に芽生えてきた種を育て本分野・Workshop を盛り上げていきたい。次回、FLS Workshop は 2027 年秋 Chicago (米) にて John Byrd (ANL) を Workshop chair として開催される予定である。