

◁研究会報告▷

“Workshop on Physics of, and Science with, the X-ray Free-Electron Laser” に出席して

羽島 良一¹, 上坂 充², 松下 正³

(¹日本原子力研究所, ²東京大学原子力工学研究施設, ³物質構造科学研究所)

2000年9月10-15日にイタリアの Arcidosso (ローマから北に車で約3時間) で上記ワークショップが第20回 ICFA (International Committee for Future Accelerator) Advanced Beam Dynamics Workshop として Cornacchia (SSRL), Lindau (SSRL), Pellegrini (UCLA) を workshop chairpersons として開催された。全参加者は76名で、アメリカ40名, ドイツ9名, イタリア14名, 日本3名の他7国からの参加があった。現在, X線領域の自由電子レーザーのプロジェクトの提案は LINAC を用いるものがアメリカとドイツでなされている。スタンフォード大学の計画は Linac Coherent Light Source (LCLS) と呼ばれ14.3 GeV の LINAC と約100 m の長さの undulator を用い Self Amplified Spontaneous Emission により波長 1.5-0.15 nm の発振を目指し2003年からの建設開始を提案している。一方ドイツの DESY の TESLA-FEL 計画では LINAC のエネルギー25-50 GeV, 波長0.1 nm, 2010年完成をうたっている。DESY では, 第1段階として230 MeV の LINAC を用いた TESLA-Test Facility において1999年末に90 nm 付近の波長で LINAC FEL のレーザー発振が確認されている。また, LINAC を1 GeV に増強して200 eV までのフォトンレーザー発振した状態で取り出して2003年から利用実験を開始するという phase II の計画も進行しており, すでに実験ホールとなる建物が完成している。SLAC と DESY の計画についてのより詳しい情報は各々の Web Site (<http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/>, <http://tesla.desy.de/>) を見ることにより得られる。

ワークショップは, 初日に4人の講演者による plenary talk があった後に, 初日後半からは Physics and technology issues of X-FEL と Science with X-FEL のふたつのグループに分れて討論を行う形式をとった。火曜日以降は, 毎朝9時に二つのグループが一緒になって前日の各々のグループの議論の内容についてグループリーダーからの報告を聞いてからまたその日の議論に入るという形をとった。

4人の plenary talk は以下のようなものであった。Kwang-Je Kim (APS) は “Present status of the X-ray

FEL” の演題で, SASE-FEL の原理と特徴を第3世代放射光と比較しながら説明した後, 最近の SASE-FEL の実験成果 (APS-LEUTL の530 nm 発振, DESY-TTF の87 nm 発振) を紹介した。J. Rosenzweig (UCLA) は “Physics and Technology issues for an XFEL” の演題で, 15 GeV 電子ライナックと100 m アンジュレータより構成される XFEL 加速器の技術的課題を説明した。特に, 1nC70fs (rms) 電子バンチで横方向エミッタンス 1 mm.mrad を達成するのはかなり困難で, アンジュレータセクションの真空チャンバの内壁の surface roughness による wakefield の影響なども考慮すると low charge option (0.2 nC/bunch) も念頭におく必要があると提案した。また, 国際的協力・課題解決の分担の必要性も力説した。Andreas Freund (ESRF) は, “Present status of experiments with short X-ray pulses and/or coherent X-ray pulses” の演題で, 放射光源, プラズマ X線源を利用した例を話し, また光学系, 検出器などのインストルメンテーションの今後の課題についてサマリーを行った。Ingolf Lindau (SSRL) は “What new science can we do with the XFEL?” の演題で, 主に SLAC の LCLS において計画されている最初の6つの実験について話した。その内容は Science with X-FEL のグループの議論と重複するのでこの部分で述べる。なお, LCLS の “最初の実験” については, DOE のもとに設けられた委員会に10月に報告を行い評価が行われると聞いている。SLAC では LCLS の Conceptual Design Report を, DESY では TESLA-XFEL の Technical Design Report をまとめる作業が進行していることが述べられた。DESY では, TDR をまとめるために主に利用実験に関連して11のワークショップを今年開催している。

Plenary session の後は, 羽島と上坂が working group 1 (Physics and technology issues of XFEL: Coordinator=A. Renieri (ENEA), 約2/3の出席者が参加), 松下が working group 2 (Science with X-FE: Coordinator=M. Sutton (Mc Gill Univ, Canada), 約1/3の出席者が参加) に参加した。

WG1 は, さらに Accelerator (leader: T. Limberg,

DESY), Collective effects (L. Serafini, INFN-Milano), SASE-FEL (G. Dattoli, ENEA), Undulator (J. Rosenzweig) の4つのサブグループに分かれ, 合同セッション, サブセッションが繰り返された。

“Accelerator”のサブグループではSバンドレーザーフォトカソードRF電子銃からの電子ビームの要求品質の達成の可能性, 計測方法, ライナックの安定性, 新しい電子銃の提案と議論された。電子ビーム品質については, ここまでのBNL (3 mm.mrad@1 nC), SLAC (3 mm.mrad@1 nC), UCLA, DESY (ここはLバンド) の低エミッタンス実績を参照し, Rosenzweigのエミッタンスの電荷量依存性のスケールリング則 (Proc. of the 6th Advanced Accelerator Concepts Workshop (AIP) (1994)) やPARMELAコード他による数値計算結果をもとに, 1 nCでエミッタンス1 mm.mrad以下達成の可能性を議論した。ここでは縦方向に分割したスライスエミッタンスの高精度補正が不可欠である (Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 3723)。結論はかなり困難で, SLAC-LCLS (SLAC-R-521) の目標として, ~ 0.2 nC, ~ 0.5 mm.mrad (熱エミッタンスは0.3程度) とするのが適切であるとするものであった。70 fs(rms)の極短電子ビームの計測法はフェムト秒ストリークカメラ (分解能200 fs (fwhm), 85fs (rms)) とコヒーレント放射光遠赤外ポリクロメータの併用がベストであることが, Rosenzweig, 上坂から報告された。また, GeVレベルになった電子ビームのスライスエミッタンス, バンチ長の同時計測法としてRF-T (Transverse)-Cavityの提案と実験予定がSLACから報告された。安定性についてSLACライナックの位相安定性が数分で0.2 deg, Eindhoven Univ. of Tech. のRFガンドライブレザーの入力RF位相に対するレーザーパルスの時間ジッターが50 fs(rms), 東大ライナックでレーザーと電子ビームの時間ジッター330 fs(rms)がstate-of-artであった。低エミッタンスを狙う新しい電子銃の提案として, Eindhoven Univ. of Tech. からDC/RFガン, UCLAからPWT (Plane Wave Transformer) RFガン, さらにRosenzweigからプラズマガンの紹介があった。特にプラズマガンは1か2か3個のTWレーザーパルスをHeガスジェットにフォーカス照射して別途電子入射器を使わず航跡場加速で10 fs(fwhm)レベルの極短電子バンチを生成するアイデアで, 電荷量は数十pCと少ないものの, 0.1 mm.mrad以下の極低エミッタンスを狙える可能性があることが紹介された。加速器について総合すると, SLAC-LCLSでPeak brightness $1.2 \times 10^{32} - 1.2 \times 10^{33}$ Photons/(s mm²mrad² 0.1%bw)達成するために, 最も重要なビームパラメータは電子銃からのビームのエミッタンス (<1 mm.mrad@1 nC or 0.2 nC)であり, 実測はファクタ3程度まできている。またXFEL実現と発展のためには, 中心となるSLAC-LCLS, DESY-TTLでの活動のみならず, BNL-ATF, ANL/APS-LEUTL, UCLA/Neptune等の小・中型マシンでの

加速器科学研究やイタリアのINFN/U.Milano/ENEAのグループの理論・数値解析研究などの国際協力体制と精神が不可欠であろう。

“collective effects”サブグループ (コーディネータ=L.Serafini (INFN-Milano)) では, “surface roughness”が議論の中心を占めた。これは, アンジュレータ・ダクト内面の微小な凹凸により生じるウェーク場がバンチ内の電子にエネルギー変化をひき起こし, SASE-FELの妨げになるという現象である。アンジュレータ中のウェーク場による電子のエネルギー変化がFELパラメータ“ ρ ” (LCLSでは0.05%)以上になると, SASEのゲインが著しく低下してしまうため, このような微妙な問題にも注意を払う必要がある。C. Pellegrini (UCLA)らは, LCLSパラメータでは, “surface roughness”の影響が大きいので設計の変更 (アンジュレータ・ギャップを広げる, または, バンチ電荷を小さくする)が必要との見解を示した。これに対して, G. Stupakov (SLAC)は, 原子間力顕微鏡を用いたダクト表面の測定結果と, それに基づいた独自のモデルによる計算結果を示し, C. Pellegriniらの用いたモデルは, “surface roughness”を過大評価していると主張した (Phys. Rev. ST-AB, 2, 060701, 1999参照)。サブグループでは, 4つの異なるモデルを用いてLCLSにおける“surface roughness”の影響を検討したが, ウェーク場の計算値がモデルによって最大1000倍異なり, 意見の一致を見るには至らなかった。今後も, 引き続き理論解析を進めるとともに, DESY-TTFやAPS-LEUTLで実験的な検証を行なうことが提案された。

“FEL process”サブグループ (コーディネータ=G. Dattoli (ENEA))では, LCLSの先を見据えた展開として, “harmonic generation”によるX-ray FELの可能性が議論された。L-H. Yu (BNL)は, BNL-ATFリニアックを用いたHGHG (high-gain harmonic generation)の実験結果を報告した。この実験では, CO₂レーザーをseed光にして, 2次高調波 (5.3 μ m)のFEL発振に成功している (Science, vol. 289, 932-934)。原理的には, 同様の装置でX-ray FELを構築することも可能である。また, S. Biedron (APS)は, FELの飽和領域に現われる高調波成分の増幅を利用した“nonlinear harmonic generation”の可能性を示した (Nucl. Inst. Meth. A445 (2000) 53-58)。これらの方式では, 外部seed光を用いることにより, 通常のSASE-FELに比べて, 時間コヒーレンスの優れたX線を得ることができる。しかし, hard X-rayを得るには多段でharmonic generationを行なう必要があり, 電子ビームと光の同期, 電子ビームに要求される特性 (エネルギー広がり)など検討すべき課題が多く残されている。

“undulator instrumentation”サブグループ (コーディネータ=J. Rosenzweig (UCLA))では, 電子ビームとX線の計測手法について議論された。電子ビームに関しては, 通常のビームポジションモニタ, セラミックワイア

一で位置と分布の計測が可能と思われるが、スライス・エミッタンスを GeV エネルギー領域で測定する方法などは未解決のまま残った。

Science with the XFEL のグループでは、DESY での TESLA-FEL 計画を例に取って得られるパルス X 線の性質を整理して理解する作業をまず行った。パルス光は全体としては約 200 fs の時間幅を持つがさらにその時間内では 2 fs 程度の鋭いスパイク状のパルスがその高さと出現頻度がランダムに分布している。第 3 世代 X 線リングに比べてピーク輝度で約 10 桁、平均輝度で約 5 桁高く、バンド幅は 0.1% と狭い。一つのパルスの中に約 5×10^{12} のフォトンが含まれている。フォトンビームのもつ角度発散は $1 \mu\text{rad}$ 程度であり、極めて指向性が高い。連続的なスペクトルを持つバックグラウンドがあり、その単位波長広がりあたりの強度はピーク強度に比べて 5-6 桁低いが、それでも第 3 世代リング光源と同等以上である。

次に、おもに LCLS において最初の実験として挙げられているテーマを中心に議論が進められた。1. Atomic Physics, Non Linear Optics : ここでは内殻に多重ホールを形成した原子、原子クラスターのクーロン爆発、XFEL により励起された物質からの放射の研究およびレーザー発振の可能性の研究、などが研究対象になることが挙げられた。また、実験のために必要な光学系についても議論された。2. Warm dense matter : XFEL 光で物質を励起し固体状態としての取り扱いも、プラズマ状態としての取り扱いも適切でない状態をつくり、かつ後続の XFEL パルス光でその状態をプローブすることを提案している。3. Femtosecond chemistry : 分子にパルスレーザーを照射して励起状態をつくり、そこから分子が解離して行く状態をパルス X 線により原子レベルの分解能の情報を得る。散漫散乱あるいは気体散乱の実験を極めて短いパ

ルス X 線で行うことになる。4. Imaging : 物質中の特定原子から放出される蛍光 X 線の干渉を検出する方法によるホログラフィーをパルス光を用いて記録し、原子レベルの分解能をもった時分割イメージングが議論された。5. Structure of single biomolecules and particles : タンパク質などの巨大分子 1 個あるいは少数分子からなるクラスターに XFEL ビームを照射すると光電子放出が起き分子が帯電したクーロン力による反発のために、数百 fs 後に分子は崩壊してしまう。しかし X 線はそれよりも早い時間に散乱されており、それを記録できれば 2 Å 程度の分解能で分子の構造が解ける可能性があることを Hajdu が提案している (Nature 406 (2000) 752)。結晶化が不可能なタンパク質の構造解明を目指す挑戦的なテーマと言える。6. X-ray interference spectroscopy : ここではパルス光を使って Speckle pattern を記録することにより物質中の非平衡状態の研究を行う事が提案された。7. Instrumentation/Optics : ここでは focusing, monochromator, pulse splitting, pulse stretching/compression, detector, intensity monitoring, synchronization が議論された。

XFEL の開発およびその利用には、まだまだ越えるべき課題が多いが、LCLS や TESLA-FEL の計画についてかなり集中した努力がなされ、具体的な目標が整理されつつあり現実味を帯びてきたとの印象を持った。このような流れを反映して活発に国際的なワークショップなどが今後開催されると思われる。そのうちのひとつとして SPIE Conference の一部として Optics for Fourth Generation X-ray Source が来年 8 月に米国サンディエゴにて開催される。今後日本で同様な計画を実行する際には、海外での活動の状況を見ながらどのような国際協力を行うかが重要な要素になるとの印象を持った。