

話 題

異分野協力によるフォトカソード研究の進展 ; Photocathode Physics for Photoinjector workshop (P3 2014) 報告にかえて

栗木 雅夫*

Progress of Photocathode Studies by Inter-Disciplinary Collaborations; for a Report of Photocathode Physics for Photoinjector workshop (P3 2014)

Masao KURIKI*

Abstract

P3 WS (Photocathode Physics for Photoinjector Workshop) was held in LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory), Berkeley, California, US from Nov. 3. to 5. 2014. This is the third of the WS series which had been started in 2010 at BNL (Brookhaven National Laboratory). The WS has been held once in every two years and the second WS was at Cornell University. In the modern accelerators, the linac becomes more important because various advanced beams which are not possible in Synchrotron can be accelerated. In the modern linac, photo-cathode is one of the most critical devices which sometimes determines the accelerator performance. In the WS, photocathode and related physics were discussed from the accelerator point of view. However, not only the accelerator physicists, but also many material and condensed matter physicists attended the WS. This is a new trend in the Photocathode studies which reflects the essential role of the Photocathode in the advanced accelerators. The WS is briefly reported.

Photocathode Physics for Photoinjector Workshop (P3 WS) が米国カリフォルニア州のバークレーで開催された。会場はLBNL(Laurence Berkeley National Laboratory)で、カリフォルニア大学バークレー校のキャンパスの裏手にある急峻な丘の上に広がる研究所である。研究所の標高はおよそ 300 m もあり、サンフランシスコ湾が一望できる絶好の展望所となっている。到着したのは WS 前日の 2014 年 11 月 2 日の日曜日であった。サンフランシスコ空港から BART (Bay Area Rapid Transport) という至極便利な近郊列車にてバークレーのダウンタウンまで到着したのはいいのだが、そこから利用しようとしていたキャンパスバス (LBNL まで運行している) が土日は運休だったため、バークレーのダウンタウンから標高 300 m を目指してのハイキングとなった。バークレー校のキャンパスを過ぎると、Cynchrotron road という道が始まる。ここから本格的な上り坂となり、車道脇に設置された木の階

段などを利用しながら高度を稼いでいく。ゲートを通過すると研究所の敷地に入るが、相変わらず急坂が続く。研究所敷地内には多くの野性動物が生息しており、その中でも多いのがリス、鹿、そして七面鳥である。これらの七面鳥は感謝祭のテーブルに上るといふ噂もある。

本 WS のプログラムにおいて特徴的なのは、Photocathode Physics と銘打っているだけあって、様々な物理的なアプローチから Photocathode というものに取り組み、その高性能化を意図している点である。プラズモンカソードやナノアレイなど、他分野で注目されているデバイスや現象を取り込み、Photocathode として機能させるという取り組みは日本でも行われているが、圧倒的なのは、物性物理の研究者が多く (おそらく半分近く) 参加していることである。これは、日本の同様の会合では、残念ながら現状では実現できていないことである。発表内容もそれを表しており、チュートリアル講演として ARPES

* 広島大学先端物質科学研究科 Advanced Sciences for Matters, Hiroshima University
(E-mail: mkuriki@hiroshima-u.ac.jp)



写真1 バークレーの丘から眺めるベイエリア。ユーカリの枝越しに見えるのは、カリフォルニア大学バークレー校のランドマークである尖塔。



写真2 WSにおける議論の様子。各セッションには議論の時間が設けられ、問題点や課題の整理などが行われる。



写真3 黄金色に輝くサンフランシスコの金門橋。

(Angle Resolved Photoelectron Spectroscopy) や SAXS-WAXS (Small and Wide Angle X-ray Scattering) など、物性物理の測定手法が Photocathode 研究のあらたな手法として紹介されていた。折しも、筆者は今年度から分子研の UVSOR でマルチアルカリカソードの UPS 測定を開始したばかりであり、非常に興味深く傾聴した。

フォトカソードは現代の加速器科学において、

とりわけ重要なコンポーネントである。それは、第三世代光源など、シンクロトロンをベースとする加速器が究極まで成熟し、極めて高性能のビームが得られるようになった一方で、その原理的限界を越えるビームの実現に線形加速器が大きな役割を果たすであろうと期待されているからである。世界各地では多くの大型 FEL 施設が稼働を始め、あるいは建設・計画中であり、また ICFA (International Committee for Future Accelerator) は線形加速器による電子・陽電子リニアコライダーを次期計画として策定している。世界統一計画である国際リニアコライダーは着々とその準備をすすめており、数年以内にもその日本建設が決定するという憶測も飛んでいる。線形加速器においては、放射減衰のようなビームダイナミクス由来の効果は無く、入射ビームが加速後のビームの性能に直結するという性質がある。それゆえ、電子源からのビーム品質が、格段に重要視されることになる。フォトカソードに特化した本 WS の成立も、このような加速器科学のトレンドを表している。

Photocathode の世界では 1970 年代に提唱された Spicer の 3 ステップモデルが標準理論となっている。3 ステップモデルとは、光電効果を光子の吸収と電子の励起、電子の伝導帯でのドリフト、そして真空物質界面からの放出という三つの過程として理解しようとするものである。光子の吸収過程は量子的な現象であり、物質の状態密度と電子の分布関数で表される電子のエネルギー準位、その準位間の光子による遷移の行列要素から決まる。一方、ドリフトや真空放出では、電子の再結合やフォノン散乱の効果などを勘案することもあるが、単純に真空をエネルギー障壁と考える古典的モデルである。P3 WS では、価電子帯、伝導帯、真空との界面における波動関数の境界条件を考慮し、光電効果そのものを一連の量子現象として取り扱う 1 ステップモデルが試みられている。Photocathode の理論的取扱いについての発表は 8 つにも及んだ。数年前に広島大学の修士課程を卒業した増元勇騎君の修士論文では、有効質量近似による結合状態密度による遷移確率と波数空間におけるドリフト、物質と真空界面における一次元波動関数によるトンネルモデルなど、光電効果全体を量子過程として捉えることを試みたことを

思い出した。当時はいろいろ関連する研究者と議論したが、モデルの恣意性を払拭することができずに、論文としての出版は断念した。改めてこのような試みがなされていることをみると、基礎に立ち返って議論を続けることの重要性を教えてもらった気がする。

WS 2 日目の午前中には研究所内のツアーが催された。訪問先は LBNL の Photocathode laboratory, 第三世代光源である ALS (Advanced Light Source), そして CW-FEL (NGLS, Next Generation Light Source) を意図して研究開発が進められている APEX 施設である。NGLS は LCLS2 として SLAC の次期 FEL 計画と統合される予定となっている。印象的だったのは、Photocathode laboratory において立派なカソード準備装置やテストスタンドに加えて、生成したカソードを真空容器にて他の研究所との間でやりとりする装置（しばしば真空スーツケースなどと呼ばれる）が設置されていたことである。Photocathode の多くは真空中において生成、あるいは活性化され、いったん活性化された photocathode は大気暴露によりその活性を失う。それゆえに、photocathode 研究は研究グループ各々がカソードの準備容器を持ち、in-situ に実験を行うのが普通である。そのスタイルは実用上の必要から生じており、また生成から性能試験までを一体として行うため実験全体を把握しやすいというメリットもある一方、常に装置依存性というやっかいな問題をも抱え込むことになる。真空スーツケースは研究所間でカソードのやりとりを可能とし、装置依存性という問題を客観的に評価することを可能とするもので、カソード研究の科学的発展に寄与するものである。また研究所間の協力をより緊密なものとするというメリットもある。

時間が前後するが、WS 初日の夜には近所の中華料理店にて懇親会が催され、技術的な面だけでなく予算や研究所の体制などについて話題が及んだ。そのなかで印象的であったのは、カソードを含む開発的研究のほぼすべてが soft money によるものだ、ということである。Soft money とは日本でいうところのいわゆる競争的資金である。競争的資金を得るのに必要なのは、研究テーマの独自性と重要性に加え、異なる組織あるいは異なる

分野の研究者の協力による相乗効果である。そのさいに大切なのは、すべての研究者にアクセスを保証することであり、そのインフラとしてカソードの真空スーツケースは誠に重要である、と認識した。再び手前味噌となるが、現在、KEK と共同して広島大学で作成したマルチアルカリカソードを真空スーツケースを利用して KEK の加速器へと実装する試験を行う計画を進めている。現代において、科学は巨大化し、加速器科学はその代表とも言える存在である。巨大科学そのものは必然的な面もあり、負の側面ばかりではないが、加速器という一体的に建設、運転を行わなければいけない装置では、その運営をする大研究所に権限も責任も集中し、大学などの小グループが参画しにくい面があるのは事実である。そのような状況は短期的には大きな問題を生じないが、大学は最大の人材の供給源であるから、加速器科学における人材育成という面からは大きな問題を孕んでいる。真空スーツケースによるカソードの供給というのは小さい試みであるが、加速器科学における大研究所と大学との加速器運転での協力、という新たな展開であり、加速器運転に大学が関わることで、人材育成という面から加速器科学の発展に寄与するものとしたい。

WS の運営は、各分科ごとにまとめ役を置き、その分科における課題をリストアップして次の WS へとつなげる、というスタイルで、WS としては標準的なものである。分科は、新奇カソード（プラズモン等）、フォトカソード理論、GaAs カソード、アルカリアンチモニーカソード、金属カソード、表面コーティング技術、ダイヤモンドカソード、そして、関連ハードウェア開発、である。すでに研究のほとんどすべてが soft money による、と述べたが、各分科の運営が、日本でいう科研費の新学術領域研究のように機能しているという印象を受けた。多くの研究者が北米に集中しており、協力研究がやりやすいという面もあるが、フォトカソードという課題に研究者各々が競争的資金を獲得し、これだけ組織的に研究が進められているということに、日本における研究状況との大きな差を感じざるを得なかった。翻って日本における研究状況を見ると、広島大学としては努めて多くの研究機関と協力してカソード研究をすすめているが、その規模には大きな隔たりがある。

日本においても競争的資金は年々増加しており、逆に基盤的経費は減少していることから、競争的資金の獲得は、研究を続けていく上で必要であり、また研究者としては事実上の義務ともなっている。より組織的な取り組みが求められているのを改めて痛感した。

今回の WS は二年後の 2016 年、会場は Jefferson Lab. 周辺ということになった。ホストとなる Jefferson Lab. の M. Poelker 氏は 80 年代ポピュラーミュージックを愛する典型的な陽気なアメリカ人である。彼とは以前、イギリスのリニアコライダー入射器の会議で同席したことがあり、夕食をとりながら、話題はフォトカソード研究の方向性、加速器科学の展開、日本におけるリニアコライダーの状況、アメリカにおける科学研究をめぐる一般的な状況など話題は多岐にわたった。彼と話していて、感じたことは、彼は研究者である一方、優秀なマネージャーであるという点である。加速器施設の運転、研究開発、そして研究グループマネジメントのバランスをとろうと意識していると感じた。もう一人、BNL の J. Smedley 氏と久しぶりに再会した。彼は、以前にアメリカで講義をしたさいに生徒であったのだが、今では私よりもよほど優秀なフォトカソード研究者である。彼は私が知っている唯一のグーグルグラスを日常的に装着した人物である。

会場となった LBNL の ALS ユーザーサポートビルからは、サンフランシスコベイエリアが一望できる。夕暮れには夕日に染まるゴールデンゲートブリッジがまさに黄金のように輝く。1990 年代に大学院生としてベイエリアに滞在したときは、スタンフォードのあるパロアルトや、アップルの本社があるクパチーノなどの地区がシリコンバレーと呼ばれ、コンピューターを中心とした新しい産業の発信地として隆盛を極めた。あれから 20 年が経過し、シリコンバレーという名称は少し古くさくなってきた感があり、いまやシリコンというデバイス開発よりはグーグルやアマゾン（アマゾンの本社はシアトルだが）に代表される情報産業へと、経済活動の中心は移っている。浮き沈みはあるものの、このエリアは世界を過去 20 年近くにわたり牽引してきたことは事実だろう。本 WS の内容は WEB で閲覧することが可能だが¹⁾、この WEB も Google のサービスである。いつでも夕暮れのベイエリアは黄金に輝いていたと思うが、今回訪れた時には、ひとときわ輝きを増していたような気がする。

参考文献

- 1) <https://sites.google.com/a/lbl.gov/photocathode-physics-for-photoinjectors/home>