

談話室

コーネル大学滞在記

石橋 拓弥*

The Journal of my Stay at Cornell University

Takuya ISHIBASHI *

1. はじめに

一昨年前、高エネルギー加速器研究機構の若手・中堅職員向け長期海外派遣制度に採択され、2011年4月から2012年4月までの1年間、アメリカ・ニューヨーク州にあるコーネル大学に滞在する機会を得た。

コーネル大学の Laboratory for Elementary-Particle Physics (LEPP) は電子・陽電子蓄積リング Cornell Electron Storage Ring (CESR) を有しており、これを利用したプロジェクトの一つとして International Linear Collider Damping Ring (ILCDR) の設計・運転に関する研究開発が精力的に行われている。このプロジェクトは CESR Test Accelerator (CesrTA) と呼ばれており、私は特にこの中の電子雲グループに所属していた。

以下ではコーネル大学での日常生活や研究について記す。

2. コーネル大学での生活

コーネル大学はニューヨーク州のイサカという田舎町にあり、ここからマンハッタンまで出るにはバスで約4時間半かかる。キャンパスは山の中に建てられており、自然の大変美しいロケーションであった。様々な野生動物が生息していて、ウサギ、リス、シカ、ガチョウなどを見ることができた (写真1)。

コーネル大学はTVシリーズ「COSMOS」で有名な天文学者・作家の Carl Sagan が働いていたことでも知られており、イサカでは Carl Sagan にちなんだモニュメントや、彼の家のいくつかを見ることが出来る (複数家を所有していたらしい)。また Richard Feynman もコーネル大学で教鞭をふるっていた時期があり、LEPP の Linux サーバーの一つには Feynman という名前が付けられている。

イサカは夏が短くて冬が長く、山中にあるためか天候が変わりやすかった。私も毎日欠かさず折りたたみ

傘を持参していた。住民はもうこの気候を諦めているようで、傘を持たずに洋服のフードで雨をしのいでいる人々をよく見かけた。また冬の寒い時期には -20°C 近くまで気温が下がり、これに加えて吹雪になるともう外を歩くことができなくなってしまう。

私はノースキャンパスにあるハウスシェア形式のアパートに住んでいた。バス・トイレ・リビング・キッチンが共用で、私の部屋は約6畳でベッドと机が1つずつあった。家賃はガス・電気・水道・インターネット・ゴミ全て込みで月540ドル、コーネル大学周辺の相場ではかなり安いようだった。ルームメイトは私の他に5人おり、みんな Ph.D. コースの学生であった。コーネル大学はアメリカの中でも厳しい大学で有名らしく、「寝ているときと食事をしているとき以外は宿題をやっているようなもの」と言っている学生もいた。キャンパス内にはいくつか滝や溪谷があり、そこには橋がかかけられているのだが、その橋には全て高い柵が設けられている。これは学業を苦しめる学生が身を投げをする学生が多く出たため、それを防ぐために最近取り付けられたものとのこと。

英語力に不安のあった私は、コーネル大学に派遣さ



写真1 まだ雪の残る春先、餌を探すシカの親子

* 高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設 KEK Accelerator Laboratory
(E-mail: takuya.ishibashi@kek.jp)

れてすぐに英語教室を探すことにした。コーネル大学周辺ではいくつか英語教室が開かれており、私はダウンタウンで行われている教室へ通うことにした。この英語教室はニューヨーク州から支援を受けており、英語力に応じていくつかのレベルに分けられている。価格は1 Semester 100ドルで安く、月曜日から金曜日まで毎日3時間開かれるというなかなかハードなものであった。そしてこの低価格にもかかわらず教員の質はとても高かった。その参加者には大学教員の奥様方やチベットの僧侶、ミャンマーからの亡命者、私のような大学の客員研究員など様々なバックグラウンドを持った人々があり、まさしく人種のるつぼであった。これとは別にコーネル大学で開講されている外国人留学生・ポスドク向けの英語教室も受講したのだが、こちらの価格は1 Semester 600ドルで非常に高く、授業は週1回2時間。友人はたくさんきたが、英語力の改善効果は（この友人達とのクラス外おしゃべりによる改善効果を除けば）ダウンタウンの英語教室の方が格段に上であった。

大学ではアジア系の学生を非常に多く見かける。そのほとんどは中国と韓国からの留学生で、日本人に会うことはほとんどなかった。コーネル大学のPh.D. コースには学費が無料になるプログラムがあるらしく、それを聞きつけた中国・韓国の学生が勉強をしに来ているらしい。

この滞在期間中、私は自動車を所有していなかったが、車を持っていない大学関係者は無料でTCATというバスが乗り放題で、これを使えばスーパーなどに買い出しに行くこともできる。また車を持っている大家やルームメイト、友人が買い物に同乗させてくれることもあったため、不自由はあまり感じなかった。

3. CESR と研究環境

CESR（シーザーと呼ばれている）はキャンパスの南側に位置するWilson Synchrotron Laboratoryにある（写真2）。周長約768 mのリングで1979年に完成した。CESRにはかつてCLEOと呼ばれるディテクターがあり、高エネルギー物理実験が行われていた。CLEOは現在撤去されており、収集したデータの解析作業が行われている。これから先もCESRを使った高エネルギー物理実験を行う予定はないとのこと。LEPPもまた縮小の方向に向かっており、加速器科学者らはCornell Laboratory for Accelerator-based ScienceS and Education (CLASSE) へ所属を移し始めている。ちなみにディテクターの名前、CLEOは何かのイニシャルをとっているわけではなく、ローマ皇帝シーザーと交際していたクレオパトラ (Cleopatra) に由来しているそうだ。

CESRは現在、CesrTAや放射光源 (Cornell High Energy Synchrotron Source; CHESS) として利用され



写真2 コーネル大学キャンパスとCESRのレイアウト

ている。光源として運転するときにはビームエネルギー5.3 GeV、水平方向エミッタンス132.8 nmが主に選ばれ、1つのリングに電子・陽電子を同時に蓄積して（リングを空から見て電子は反時計、陽電子は時計回り）放射光を提供している。また次期計画としてCESRを利用してのEnergy Recovery Linac (ERL) の研究開発が進められている。

CESRでは一人一台デスクトップPCが割り当てられ、OSは基本的にScientific Linuxが使用されている。ほぼすべてのデスクトップPCがコンピュータグループにより管理されており、ちょっとしたソフトをインストールするにもコンピュータグループの許可が必要となる。また実験データ、シミュレーション結果などはLinuxサーバー上で共有されている。加速器の制御もLinuxベースで行われている。CESRでは加速器設計のための汎用計算機コードとして、David Sagan氏 (Carl Saganさんの従兄弟らしい) らによってここで開発・管理されているBMADと呼ばれるFortranで書かれたコードが使われている¹⁾。これはKEKで言えばSAD、CERNではMADにあたるものである。

私の所属していたCesrTAではILCDRに関連したビームモニタや電子雲不安定性などの研究が行われている。スタッフの総数はおよそ30名程度で、プロジェクトリーダーで私のスーパーバイザーであったMark Palmer氏が非常に強力なリーダーシップで舵取りを行なっている。毎週金曜日にはCesrTA General Meetingが開かれ、各グループ間で情報の共有、議論が行われている。Palmer氏はFermilabの将来計画であるミュオンコライダーのディレクターに就任し、本年中にシカゴへ移るそうだ。そのため私がコーネル大学を去る直前は、David Rubin氏とMichael Billing氏が二人体制でCesrTAを運営していた。

CesrTAのマシINSTAディは現在、年4回ほど、各

3 から 4 週間ずつの期間で行われている。24 時間体制でシフトを組み、様々なラティス、バンチパターン、ビーム強度のもとで実験が行われる。エネルギーは 2.1-5.3 GeV 程度が選ばれている。Shielded Pick-Up (SPU) と Retarding Field Analyzer (RFA) による電子雲密度の測定や、電子雲によるチューンシフトの測定、V/XBSM の研究開発などがこのマシンスタディでは行われている。

4. 光子散乱シミュレーション

BMAD ライブラリーの中の一つで、リング内の光子分布を計算するコード SYNRAD3D が CesrTA で開発されている。このコードは高エネルギー電子・陽電子ビームからの放射光生成と、真空パイプ表面での放射光の反射を 3 次元空間でシミュレーションする。プログラムは David Sagan 氏を書いており、光子の散乱モデルは Gerald Dugan 氏が開発している。SYNRAD3D の開発が始まった動機は、電子雲成長をシミュレーションするコード (POSINST²⁾ や E-CLOUD³⁾ など) への重要なインプットとして、真空パイプに光子が吸収された場所での光子の位置情報とそのエネルギーを見積もるためである。SYNRAD3D ではどのようなラティス、真空チェンバー形状に対しても光子分布を計算することができる。ただし計算を実行するには MAD 等に使われている Extended Standard Input Format (XSIF), もしくは BMAD フォーマットのラティスファイルと、リング全周にわたる真空チェンバーのウォールプロファイルが SYNRAD3D のインプットファイルとして必要となる。私はまずこの SYNRAD3D の改良とテストに携わることとなった。

私が CesrTA に配属される以前まで、リング全周を通して断面 9×4 cm の楕円形をした真空チェンバーになっていると仮定して SYNRAD3D テストが行われていた。このとき、光子エネルギーと反射率との関係はアルミニウムに 4 nm の Al_2O_3 層があるとして見積もられ、また光子はチェンバー壁で鏡面反射すると仮定していた。このシミュレーション結果は SPU による電子雲密度測定や、電子雲によるチューンシフトの測定結果にもよく合っていた。そこで今度は CESR で実際に使われている真空パイプの形状を SYNRAD3D に入れ、その光子分布を計算した。例として図 1 に CESR で最もよく使われているチェンバーの断面形状を示す。これらのチェンバープロファイルに対するシミュレーション結果は測定と全く一致しなくなってしまうことがわかった⁴⁾。測定結果をシミュレーションで再現するには、電子雲を生成するためにチェンバーの上底面で吸収される光子が必要なのだが、実際のチェンバー形状に対して計算するとこの光子数が非常に少なかっ

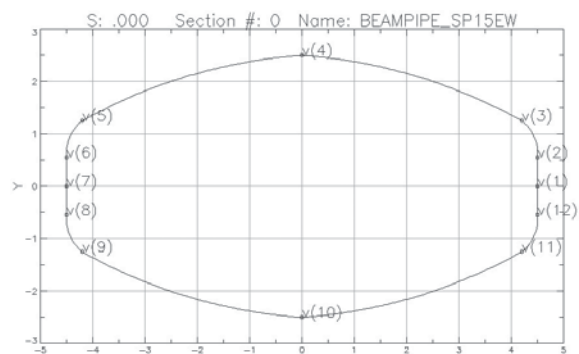


図 1 CESR で使われているチェンバーの断面形状例。単位は cm。

た。これは光子が照射される領域のチェンバー形状が、光子ビームをコリメートしてしまい、チェンバーの上底面に十分な光子数が供給されていないためであった。そのためチェンバー表面で反射された光子の角度分布には幅があり、実際は鏡面反射ではなく乱反射が支配的ではないかという結論に至った。

チェンバー表面のプロファイルは RMS 表面粗さ σ と相関長 T との比、 T/σ で特徴付けられる。光子の入射面内角方向、および面外角方向の散乱分布はこの T/σ と光子の入射角、エネルギーによって決まる。

CESR で使われている真空チェンバーの RMS 表面粗さ σ は数百 nm、相関長 T は数 μm のオーダーで、支配的な放射光の波長 λ は 124 nm (10 eV) から 0.124 nm (10 keV) の範囲であると見積もられている。このような条件 ($\sigma/\lambda \gg 1$) では Beckmann-Kirchoff 理論に基づいた “very rough surface diffuse scattering” モデル⁵⁾ が適用できるため、SYNRAD3D にこのモデルを組み込むこととなった。このモデルにおいて光子は乱反射のみをし、鏡面反射成分はないと仮定している。

SYNRAD3D により乱反射を考慮した光子散乱の計算をするにあたり、CESR で使用されている押し出しアルミチェンバーに対して表面構造の分析を行った。この分析には Cornell Center for Materials Research (CCMR) 所有の原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope; AFM) を使用させてもらった。この分析の結果、チェンバーの RMS 表面粗さは約 100 nm、相関長は約 5000 nm と見積もられた。

この乱反射モデルを組み込んだ SYNRAD3D で計算した結果、チェンバー上底面で吸収される光子数が増え、SPU やチューンシフトの測定結果と一致するようになった。乱反射を含む SYNRAD3D は数々の実験データと比較・検証がされ、その有効性が確かめられた。そのため、ILCDR についても光子分布シミュレーションを行うこととなった。

ILCDR のシミュレーションには David Rubin 氏が開発したラティス、dtc03 (5 GeV, 周長 3268 m) を使用

した。ILCDRの概念設計にはSuperKEKBのアンテチェンバー付ビームパイプを参考にしており、これをもとにSYNRAD3Dのウォールプロファイルを作成した。ILCDRのQM, BM, Drift, Wiggler, 4つのセクションについて光子分布を計算すると、Miguel Furman氏がELOUD'10にて報告した値⁶⁾, $0.47 \text{ photons/m} \times 0.9$ (reflectivity) $\times 0.02$ (antechamber efficiency) = 0.0085 photons/m より約5倍, 光子強度が大きいことがわかった。これはアンテチェンバー内で反射した光子がビームパイプへ戻ることと、Wigglerでの放射光がリングをしばらく回ってしまうことが大きく寄与している。そのため、引き続きアンテチェンバー部の形状や、フォトンストッパーについて研究が、またこの光子分布における電子雲シミュレーションが行われている。このシミュレーション結果は2012年末完成予定のILCの技術設計報告書(Technical Design Report; TDR)にも盛り込まれることになっている。

5. 光子の散乱率測定

SYNRAD3Dの光子散乱モデルを改良するため、放射光源のビームラインを利用して、CESRで実際に使用されている真空パイプの放射光散乱実験を行った。コーネル大学以外にもいくつかの研究所が光子の散乱実験に興味を持っており、コーネル大学を中心にCollaboration for Photon Reflectivity Measurementsが立ち上げられた。INFNやKarlsruhe Institute of Technology (KIT)の光源ANKA, Argonne National Laboratory (ANL)の光源Advanced Photon Source (APS), KEKなどの加速器科学者らがこのコラボレーションに参加している。

私はCHESSとドイツ・ベルリンにある放射光源BESSY II, 2つのセッションに参加し、散乱実験を行った。CHESSではG2ビームラインと呼ばれる9 keVの光子を提供している光子散乱実験用ステーションを利用した。実際のリングでは数eVから1 keV程度の光子が支配的で、散乱率も大きいためフォトダイオードで検出しやすく、乱反射も測定しやすい。しかし、CHESSではこのようなエネルギー領域の放射光を提供しておらず、9 keVで実験することとなった。この実験のサンプル回転角方向のスキャンにおいて、光子の強度分布にダブルハンプが現れた。これは押出によって作られたアルミチェンバー上のグループ構造に由来しているためであり、現在のSYNRAD3Dではこのグループ構造を考慮していない。

BESSY IIでは20 eVから1.6 keVの光子を提供しており、またこの範囲でエネルギー(回折格子の角度と種類)を変えながら散乱実験が行える(写真3)。このときのビームタイムにはコーネル大学から私、INFNからはRoberto Cimino氏、ANKAからはSara Casalbuoni

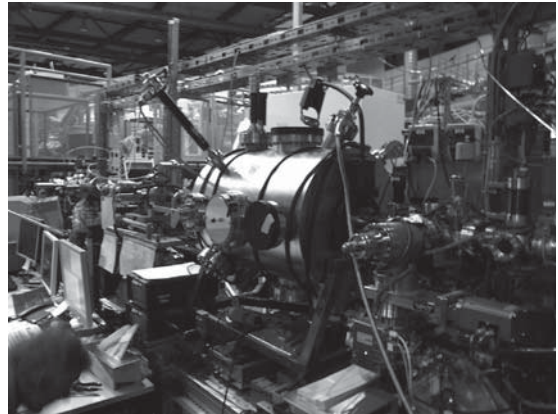


写真3 BESSY II ビームラインに設置された反射率計を収めたチェンバー

氏が参加し、互いにサンプルを持ち寄って散乱実験を行った。私が日本に帰国した後も引き続きコーネル大学と協力して、散乱実験データの解析を進めている。また不定期で開催されているCollaboration for Photon Reflectivity Measurementsの電話会議で散乱実験の解析結果が共有・議論されている。

6. おわりに

このコーネル大学滞在中、様々な人と出会い、多くの貴重な経験もさせていただいた。特にCesrTA電子雲グループでお世話になった、Mark Palmer氏、Gerald Dugan氏、David Sagan氏、Michael Billing氏、David Rubin氏、Kiran Sonnad氏、James Crittenden氏、David Kreinick氏、Joseph Calvey氏、Walter Hartung氏、Joseph Conway氏らに感謝の意を表します。またこのような機会を与えて下さった高エネルギー加速器研究機構、及びこの海外派遣を応援して下さったKEKB真空グループの皆様にも心より感謝いたします。

参考文献

- 1) BMAD Subroutine Library for Relativistic Charged-Particle Simulations, <http://www.lepp.cornell.edu/~dcs/bmad/>
- 2) POSINST, https://oraweb.cern.ch/pls/hhh/code_website.disp_code?code_name=POSINST
- 3) ELOUD, <http://wwwslap.cern.ch/collective/electron-cloud/Programs/Ecloud/ecloud.html>
- 4) L. Boon, J. Crittenden, K. Harkay, T. Ishibashi, APPLICATION OF THE SYNRAD3D PHOTON-TRACKING MODEL TO SHIELDED PICKUP MEASUREMENTS OF ELFCLOUD BUIDUP AT CesrTA, Proceeding of IPAC2011, WEPC141 (2011) 2319.
- 5) Petr Beckmann, Scattering of Light by Rough Surfaces, Progress in Optics, 6 (1967) 53.
- 6) M. A. Furman, ILC Damping Rings: Benefit of the Antechamber or: Antechamber vs. SEY, ELOUD'10, LBNL-4474E (2011).