

SRI - 93 世界の放射光研究開始30周年記念の催し

佐々木 泰三

昨1993年は放射光を用いた分光学の実験が米国NBSで最初の輝かしい成果をあげてからちょうど30年の節目を迎えた。Maryland州, Gaithersburgで開催されることになっていた第8回の米国のSRI (Synchrotron Radiation Instrumentation) のNational Conferenceでは、この機会に米国と世界の放射光研究の開始30周年を記念するAnniversary Sessionを計画した。

この年は更に Wisconsin 大学の Synchrotron Radiation Centerの光源Tantalus Iが動き出して25周年にあたる。1960年代はまたヨーロッパと日本でも放射光利用が軌道にのった時代でもあった。SRIの会議は1982年にHamburgで始まり、3年毎に米、欧、亜の持ち回りで開催される国際会議で、1988年には第3回がつくばで催されたのはまだ記憶に新しい。国際会議のない中間の年には米国が独自にNational Conferenceとして同名の会議を開催し、去年でもう8回目になった。

ホストとなったNIST (National Institute of Standards and Technology) はNBS (National Bureau of Standards) の後身で、Washington, D. C. から車で一時間くらいの片田舎Gaithersburgにある。会議は93年8月23日から26日まで、この研究所のAuditoriumであったが、日本からの参加者は原研の佐々木茂美さんと私とNECの一人の三人だけであった。

NBSの歴史的な論文は1963年9月のPhys. Rev. LettersにのったHeliumとNeonの自動電離領域の吸収スペクトルで、Fano効果(連続準位

と離散準位の縮退によって生ずる吸収プロファイルの特異性)の詳細なデモンストレーションによって、放射光の強い軟X線連続スペクトルの有用性を見事に実証し、原子の内殻励起に固有の多電子過程の奥深さを示唆する画期的な仕事であった。

このころ日本では田無の原子核研究所でINS-SORグループのビームラインが設置され、ビームの安定性や、スペクトル、偏光特性などの測定が始まっていた。それから2、3年の間に日本とドイツ(DESY, Hamburg)の放射光施設が相次いで成果をあげはじめ、一方NBSはWashington, D. C. からMarylandへの移転のため活動停止を余儀なくされ、Wisconsinが1968年に動き出すまでアメリカは鳴かず飛ばずの状態であった。

主催者側の意向で、このお祝いを単にアメリカの施設の記念行事に止めず、世界のパイオニア放射光研究が1963-68の間に立ち上がったという歴史を記念するため、日本とヨーロッパからも参加してもらいたいという要請があって、昨年末までESRFの所長をつとめたKiel大学のRuprecht Haenselと、日本からは当時のINS-SORを代表して私に講演の依頼があった。NBSの実験の思い出をしたのは、この有名な仕事をBob Maddenと一緒にやったKeith Codling(Reading大学、英国)で、一方Wisconsinの話はG.Lapeyreが光電子分光の歴史にしばって講演した。Haenselは昔話から離れて、この30年間放射光研究が世界的規模でどう展開したか、展望も含めてglobalな話をし、私はNBSのSURF-IとWisconsinのTANTALU-

Iの仕事の歴史的意義を外からどう評価するか、世界の放射光研究の中でどう位置づけるか、という点と、当時から今日までの放射光や加速器の分野での日米協力の歴史について話した。この際ついでに戦後の日本の加速器研究の立ち後れには占領政策の影響が大きいこと、終戦直後、日本に4台あったサイクロトロンを占領軍が残らず解体して東京湾と大阪湾に放り込んでしまったこと、加速器研究の禁止を解除するよう、他ならぬ Earnest Lawrenceが来日して占領軍首脳を説得し、サンフランシスコ条約締結に先立って禁が解かれたこと等を話したが、この話は聴衆の殆どが初めて聞いたとびっくりしたようだ。

会議全体の印象はやはりさすがアメリカ、中身は濃く、たくさんの新しいアイデアや実績の報告があって充実していた。こういう会議に日本から人が来ないのはもったいない。勿論かく云う私も7月になって突然来て話をしろと云われるまで会議の予定すら知らなかった。特にアメリカの放射光研究が活気づいているのは Argonne の APS (Advanced Photon Source) の建設が着々と進んでいることもあるが、その他にもカリフォルニア大学 Berkeley の ALS (Advanced Light Source), ルイジアナ州立大の CAMD (Center for Advanced Microstructures and Devices), それにIBMの小型光源 Helios という、それぞれ特徴のある軟 X線光源3施設がいずれも好成績で稼動しているのも大きい。

初日の午前はこれら4施設からの報告があり、その他の既存施設は常設ポスターで全会期中展示されていた。

CAMD (V. Saile, 所長) は 1.5 GeV, 300 mA の研究と産業利用の両にらみの施設で、1991年秋に完成、92年9月以降研究に公開している。基礎研究では固体、表面、化学反応が主で、ルイジアナ州立大のほか、テネシー大、チュレイン大 (ルイジアナ), NIST, それにブラジルの放射光施設 LNL (Campinas) が TGM のビームラインを建

設して参加しているのが注目される。産業利用には15本の BL の内5本が割り当てられ、半導体プロセス、マイクロマシンが中心である。ユニークなのは学生を訓練してマシンの運転当番をやらせている点で、これは加速器技術、放射光利用技術の教育訓練の一環となっており、常時50人の学生がこの活動に参加しており、学生の意欲は旺盛で、20人のスタッフの強力な援軍になっているという。

IBMの小型光源 (J. P. Silverman) も91年春に Oxford Instruments が完成品を East Fishkill の先端 Lithography 研究施設に納入し、92年初めから定常運転している。686 MeV ($\lambda_c = 0.87 \text{ nm}$), 200 mA 入射時で寿命は20時間、93年前半までの稼働率は95%を超えるという。入射は200 MeV LINAC を用いているが、低エネルギー入射 (86 MeV) も試験中である。

ALS (1.5 GeV) (Brian Kincaid, 所長) もなかなか好調で、92年12月に完成、93年4月末現在で456.6 mA を記録し、8月には利用実験も始まった。当初2年間は挿入部5本、偏向部5本でスタートの予定で、5本の挿入部のうち最初の2本は材料、表面研究用、高い波長・空間分解能を持つ70-1200 eV の spectromicroscopy をめざす。3本目は chemical dynamics, 4本目が projection lithography と X線光学の R & D, 5本目は楕円偏光 wiggler (50 eV-10 keV) で、材料、生物試料の円偏光測定、磁性映像をねらう等、何れも challenging な目標を掲げている。

APS (Dave Moncton, 所長) の話は日本の SPring-8 と比べながら聞くと色々気になる点が多い。エネルギーは当初7 GeV で計画されていたが、実施段階で色々変わってきて、現在の設計では7.0 GeV で300 mA (当初100 mA), 7.5 GeV で200 mA, 設計上は7.7 GeV まで拡張が可能になっている。電流値の目標を上げたのは front end の熱負荷対策の R & D の進歩に対応したもので、今のところ500 W/mm² までなんとかなるという。分光結晶も斜

入射でGa冷却を使って短時間なら150W/mm²までいける。CAT (Collaborative Access Team, ビームライン建設の主体となるチーム) の申請19に対し、既に15チームが認可を受け、ビームライン予算200M\$ (220億円) の内約半分が配分されている。(その後11月現在で22/30となった)。第一期には32のビームラインで研究が始まり、CATには民間会社25, 国立研18, 大学と医学系学校78, 500人が参加する。APSのマシン系の特徴は450MeV陽電子リングで予めエミッタンスを下げてからブースターに入射する点である。もう一つは入射頻度を上げて“Top-off”運転をした上で、1-2ミクロン精度のBPM (Beam Position Monitor) を挿入部に配置して“digital global feedback system”によってビーム安定性を高めるといふものである。予定ではマシン系全体の完成は95年1月となっており、ビームラインに光を出して実験を始めるのは95年夏になるという。

その他の口頭発表のセッションは初日午後が熱負荷, 2日目: 円偏光の発生と応用, マイクロフォーカス, 検出系, 3日目: VUV/SXの装置・技術, 微細加工, X線光学素子, 映像技術, 4日目: 新光源技術, FEL, コヒーレンス, という構成で、一方ポスターセッションは、初日: 施設, ビームライン, 2日目: 利用技術, 検出系, 3日目: モノクロ, 光学素子, となっていた。日本から見て参考になる話題を以下にいくつか紹介する。

熱負荷は現状でもなかなかの問題だが、特に次世代放射光利用の最大の難関と云ってもよい。APSの周辺で精力的にこの難題に挑戦するR&Dが続けられているが、この点ではNSLS-X (Brookhaven, 2.5GeV) とCHESS (Cornell, 5.3GeV) という既存の施設でテストが出来るという点が有利である。勿論日本にもPFやARがあり、ヨーロッパにもHASYLABがあるが、Cornellにはウィグラーが動いていて、ここでは次世代光源の熱負荷をほぼシミュレートできる。R&Dのアプローチはアメリカとヨーロッパの間で異なっ

おり、APSはガリウム冷却、ESRFはCryogenic (液体窒素冷却) を中心に開発を進めており、今後の結果が注目される。APSでは当面予想される熱負荷の上限を全量で15kW, 単位面積当たり400W/mm²と見ており、これはCHESSで5.3GeV, 500mAのとき、25極ウィグラーからの出力32kWを直入射で受けた時の熱負荷に相当する。一方、NSLSのX25ウィグラー・ビームラインではトロイドで集光すると230W/mm²で試験ができる。熱負荷対策としては 1) 面の受けるエネルギー密度をなるべく小さく, 2) 受けた熱を有効に除去 3) 変形を力学的に補正する (Adaptive Mirror) 4) 熱的・力学的にすぐれた材料・形状をさがす (ダイヤモンド等), という段階がある。1) については斜入射で受光することで400W/mm²を30W/mm²以下におさえることが可能である。APSではガリウム冷却と液体窒素冷却の両者を比較検討している。

円偏光に関してはNRL (Naval Research Laboratory), UW (University of Wisconsin), NSLS, ATT等のグループから磁気円偏光2色性(MCD)の報告が3件あり、磁性薄膜, 磁性多層膜の研究が注目をひく。特にWisconsinのTonnerの仕事はMCDと光電子顕微鏡の手法を組みあわせて表面の磁区を映像化したり、10nmまでの深さ方向の診断をしたりするものである。またUWのPatelらのグループは多重反射型1/4波長板でアンジュレーターの直線偏光を光学系の後で円偏光に変換する方が磁場交差型の円偏光アンジュレーターを軌道に組み込むよりも有利だと考えている。その方針にそったX線光学材料の検討を進めている。ポスターでは円偏光に関して7件の報告があり、最近原研でテストされた回転方向可変の円偏光アンジュレーターAPPLE 1の結果(佐々木茂美)もこの中に含まれている。その他ではNevil Smith (ATT) とMarcom Howells (ALS) の4枚鏡円偏光子Whispering Galleryと、これを組み込んだNSLSのU5Uビームラインの分光器が非常に面白い。この設計の理論的基礎となる直線-円

偏光変換の効率 TP^2 (T は透過率, P は円偏光度)を有望な材料について計算しており, 例えば $h\nu=105\text{eV}$ でRhが56%, Agは125eVで44%になる。反射型偏光子としては古くから平面で3枚鏡か, 4枚鏡のものが用いられてきたが, 鏡を曲げて多重反射させ, 大きな位相差を簡単に実現する「ささやきの廊下」のアイデアはなかなかの傑作である。

マイクロビームに関しては細管 (Capillary Tube) や細管束 (Polycapillary) の報告が多く, これは残念ながらわが国では殆ど試みられていないので特に関心を持って聞いた。この device は Washington University の F. A. Stern の提案 (1988) が発端のようで, 今, ドイツ, スウェーデン, フランス等でも開発, 実用化が進んでいる。米国ではワシントンの他, Cornell, X-Ray Optical Systems, Inc, 等から報告があった。一例をあげると, コーネル大学のものでは鉛ガラスの引き抜きチューブ, 外径1mm ϕ , 内径22~45 $\mu\text{m}\phi$ のものをもとに成型し, 長さ1m, 終端1 $\mu\text{m}\phi$ ~0.1 $\mu\text{m}\phi$ 程度のものを加工でき, 集光利得は960という結果が報告されている。白色光, 単色光どちらにも利用できる。蛋白の結晶解析, 硬X線映像技術への応用がすでに試みられている。更に一歩進めて, この細管を束にした Optical Fiber も製作されており, 集光, 結像, 平行化, フィルター等に利用でき, 可視光の光ガイドのように曲げることもできる。設計には光線追跡法によるシミュレーションが有効で, 実験結果とよく一致する。これを用いて回転対陰極型のX線管で撮った回折像の強度を一桁上げた, という報告もある。

一方, 多層膜のX線光学系を用いた光電子顕微鏡MAXIMUM (UW) も注目を集めている。これはSchwartzschild型光学系を用い, $h\nu=95\text{eV}$, 電子エネルギー分解能0.3eV, 空間分解能90nmでGaAs (110) の劈開面の表面付近のエネルギー・バンドの曲がりのようすを見事に映像化している。キャピラリーについてはポスターでも多くの報告

があった。

その他の話題についても新アイデア, 試み, また従来の水準を超える新しい結果はたくさん報告されていて, これらをすべて取り上げてはきりがない。とりとめのない話になることを覚悟して, 特に目についたものだけを個別に紹介することにする。

3日目のVUV/SXの装置技術のセッションで報告されたPadmoreのSX回折格子分光器の効率の理論にはいささかびっくりした。これは従来の計算法の逆の手順を採用し, まず反射材料を決めた上で一つのフォトン・エネルギーで最大効率を得られるように入射角, 溝形状, 結像条件を最適化する。その結果は実測されている回折格子の分光効率と驚くほどよく一致する。

HowellsがALSで計画している軟X線フーリエ変換分光器はMach-Zehnder型の干渉計を用いて $h\nu=60\sim 80\text{eV}$ 領域でヘリウムの自動電離スペクトルの高次共鳴プロファイルや, 負のパリティ系列の精密測定を目指し, BESSYのDomkeらが最近やった高分解スペクトル ($E/\Delta E\sim 16000$) を超える超精密実験をねらっている。(光路差=1cm) / (波長=10nm) = 10^6 の分解能が目標という恐るべきアイデアである。またCerrina (UW) らはX線光学系の検査に普通用いられる可視光ではなく, まさに実用する光 (SX) の波長で行うX線フーコー・テストを提案し, MAXIMUMで用いるSchwartzschild対物鏡の検査に用いている。

3日目のポスターではALSで計画している縦分散の6.65m off-Planc Eagle (PFの6VOPEと同等) の報告があった。これにはNASAの波岡さんと島津製作所の小池さんが協力していて, 成功した日本のノウハウが注入される上, この装置はアンジュレーターに接続されるので, フォトン・ファクトリーのBL-11Bは間もなくきびしい競争に直面することになるであろう。波岡さんの話ではアンジュレーター光は狭帯域なので, 6VOPEで用いたプレディスペーサーは必要がなく, 設計

もシンプルになる上、明るさも格段に優るということである。

最終日は午前前半にアンジオグラフィ用小型光源、左右可変円偏光発生技術2件(NSLS, CAMD)、短波長FEL2件(NSLS, SLAC)、後半にコヒーレンスとその利用がテーマとなった。IBMのSpillerがコヒーレントX線の理論と応用の分かりやすいReviewをしたあと、Sutton(McGill U)がスペックル・パターンを用いたゆらぎの測定、McNully(APS)がホログラフィー、Gluskin(APS)がNSLS-X13Aでの干渉計実験の報告をした。

この会議のProceedingsは今年後半にはNorth-Holland Publ. からNIMの別冊で出版されるもようである。

この会議の祝賀行事は本会議とは別に、ワシントンのアメリカ歴史博物館で行われたバンケットでもあり、Bob Maddenがスピーチをした。その

中でMaddenは多年ウィスコンシンのTantalus I, Aladdinを建設、運営して数多くのユーザーに光を提供し、献身的に働いたEd Roweの功績を讃え、この年の秋、ミネソタ州立大からRoweに対し名誉学位が授与されることを公表し、盛大な喝采を受けた。これは彼の人柄とたゆまぬ努力、一貫してuser friendlyであった彼と彼のチームに感謝するusersの気持を伝えようと、今はミネソタ州立大の教授であるJohn Weaverとアイオワ州立大のDave Lynchの二人が発起人となって、米国内のみならず、国外の友人達にも賛同を求め、大学当局に働きかけて実現したものである。私もこの提案に賛同して学長宛の推薦状を送ったひとりであったが、多年報いられることを求めず、縁の下の努力を惜しまなかった先覚者の功を讃えるWeaverとLynchの二人の暖かい志と友情に強い感銘を受けた。

◁研究会報告▷

UVSOR 10周年祝賀会および研究会

鎌田 雅夫 (分子科学研究所)

昭和58年11月10日に分子科学研究所のUVSORに放射光が出て10周年になりました。これを良き機会として、UVSORのこれまでを振り返ると同時に今後の研究の発展を期するために、平成5年12月3日に10周年記念祝賀会を開きました。第一部の記念講演会では、伊藤分子研所長の挨拶のあと、施設の現状(薬師)や光源の現状と

自由電子レーザー(磯山)についての現状報告が行なわれ、UVSORの10年の歩みを渡辺 誠氏(東北大)が懐かしいスライドを交えながら話され、最後に、関 一彦氏(名大)がSOR利用の将来と分子科学についての研究展望を披露されました。見学に引き続く第二部の記念パーティーでは、文部省をはじめ、ユーザー、他施設、学界な