

## HASYLAB, BESSYにおける 単バンチ実験

電子技術総合研究所 齋藤 則生

1993年8月26日から1994年11月1日まで、アレクサンダー・フォン・フンボルト財団の奨学研究員として、ドイツ、ベルリンにあるマックス・プランク財団のフリッツ・ハーバー研究所(FHI)において、Becker教授の指導のもと在外研究を行った。この間、BESSYのシングルバンチおよびHASYLABのシングル、ダブル、5バンチの放射光を合計約8週間使うことが出来た。簡単ではあるがこの時の状況および行った実験等についてここに紹介させていただきたい。BESSYについては、横山氏(広大理)が第5巻第3号に詳しく書かれており、重複する点があると思うが、ご容赦願いたい。

FHIの歴史は古く、創立100年近く経っている。元は化学を主にした研究所であったらしいが、現在は、物理・化学・表面・理論等基礎的な分野において先端的な研究がなされている。研究所は、ベルリンの南西部のDahlemに位置し、ベルリン自由大学に隣接している。

私が赴任した当初、研究室には、ドイツ人のポストドクが3人、アメリカ人が1人、ドクターコースの学生が9人もいる大所帯だった。しかし、私の滞在中に、ドイツ人のポストドク3人、学生1人、アメリカ人がドイツを脱出して、アメリカに渡って行った。現在、ドイツは不況で、物理系の学生の就職先が非常に困難になっており、アメリカにポストを捜して出ていくのしかたがないと思われる。また、3人のロシア人科学者が約半年間研究室に滞在し、理論計算を中心に研究を行った。彼らは、ポジションを求めて、ドイツ国内の研究所に移っていった。ロシア情勢が緊迫した時期とも

重なり、ロシア人科学者にとって困難な状況は続いていると感じた。

研究室のテーマは大きく分けて、4つある。

- 1) 原子・分子の光電子分光。
- 2) 原子・分子の光イオン分光。
- 3) 原子・分子のスピンの偏極光電子分光。
- 4) 偏向原子の光電子分光。

1) で扱っている試料は、希ガス、小さい分子、Mg、C<sub>60</sub>である。扱う試料によって、担当者が異なっているが、実験は共同して行っている。電子エネルギーアナライザーには、飛行時間型測定器(TOF)を用いている。このため、光源はパルスである必要があり、シングルバンチ(あるいは小数バンチ)の放射光を利用している。電子TOF測定の利点は、低エネルギーから高エネルギーにわたって検出効率が一定で、且つエネルギーのスクランをしないでスペクトル全体を測定できることである。欠点は、電子エネルギーの高い領域では飛行時間が小さくなるために分解能が低くなることであるが、その点は随分改善されつつある。実験装置は、3台のTOFを0°、-90°、および120°の位置に備えており、光軸を中心に回転することが出来る。このため、電子の角度分布が、比較的短時間で測定できる。さらに、2電子放出過程(直接2重イオン化、オージェカスケード等)において、2つの電子の同時計測ができ、放出電子間の角度依存性も測定可能である。Heの2重イオン化のしきい値付近およびNeの1s励起状態からのオージェ1カスケード過程において、電子・電子同時計測と

角度分布を測定した。

2) は、私が担当したテーマである。装置は、イオンTOF型質量分析計に2次元位置検出器(PSD)を備えたものと、電子TOFを組み合わせたものである。最終的には電子とイオンのコインシデンスを取ることが目的であるが、現段階ではイオンTOFを立ちあげるのが先決であった。この装置のアイデアは、イオンTOFにPSDを組み合わせることによって、測定するそれぞれの現象毎にイオンの生成時におけるイオンのエネルギーと放出方向が求まることである。また、高速の電子トロンクスを使用することにより、4体解離までの現象を同時に測定できることである。このイオンTOFのイオン飛行時間も放射光のパルス基準として測定する。イオンは電子に比較して飛行時間が長いので、イオンTOFは短くしてある。それにもかかわらず、イオンは数百ナノ秒の飛行時間を要するので、放射光のパルス間隔によっては限られた実験(軽いイオンのみ)になってしまう。この装置を使って、以下の実験を行った。

(a) 内殻励起分子の解離過程に振動レベル依存性はあるか?

CO分子の内殻励起状態から解離したイオンに振動レベル依存性は顕著には見られなかったが、解離しなかったCO<sup>+</sup>とCO<sup>2+</sup>は、励起振動レベル依存性がはっきりと現れた。N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>やN<sub>2</sub>O分子については、その様な兆候は見られなかった。

(b) 内殻励起分子から解離したイオンの角度分布に励起振動レベル依存性はあるか?

CO、CO<sub>2</sub>について調べたが、解離イオンの角度分布にはっきりとした励起振動レベル依存性はみられなかった。しかし、角度分布に解離運動エネルギー依存性のあることが分かった。

(c) 3体解離のとき、直線3原子分子は解離時に依然として直線か?

CO<sub>2</sub>とN<sub>2</sub>Oについて調べた結果、分子は曲

がった状態から解離していることが分かった。  
3) はHeinzmannのグループと協力して行っている。装置は、電子エネルギーアナライザーとしてのTOFと、電子のスピンを測定するモット検出器を組み合わせたものである。スピン偏極光電子分光の実験をするには、一般に円偏光の光源が必要である。またこの装置は電子TOFを用いるので、シングルバンチからの円偏光した放射光が必要となる。BESSYには、円偏光を利用できるU2-FSGMビームラインがある。2つのアンジュレータを水平方向と垂直方向に置き、その間に設置したモジュレータによって、左右円偏光、直線偏光を作り出すことができる。モジュレータに流す電流を制御することによって、約10Hzの速さで左右円偏光度の切り替えが可能である。このビームラインでは、円偏光度約50%、エネルギー25~200eV、分解能約5,000の光が利用できる。しかし、エネルギーが高いところでは円偏光度は50%よりも低い値になるようである。また、蓄積電子ビームの電流や位置等によっても円偏光度は変化するので、実験中に円偏光度を測定しなければならない。最初の実験は、Xeの5p<sup>2</sup>P<sub>1/2,3/2</sub>からの光電子のスピンの偏極度を、光エネルギー26~55eVにわたって測定することに成功した。

4) は、プロジェクトがスタートして間もない。高周波放電によって生成した原子のスピンを揃え、そこからの光電子を半球型電子エネルギー解析装置を用いて、その角度分布を測定する。電子アナライザーは通常の静電型なので、通常運転の放射光を利用している。偏向した原子の量が多く得られないので、非常に強い光源が必要である。初期データとして、酸素原子からの光電子の角度分布が測定された。

私が、最初にBESSYのシングルバンチ放射光を使ったのは、1993年11月半ばから3週間の期間であった。最初の1週間は、リソグラフィ用のビームタイムで、そのあいだに装置のセットアップ調

整を行い、次の2週間がシングルバンチ運転であった。BESSYでは、1週間のリソグラフィ、それに続き2週間のシングルバンチが1年間に2回与えられている。シングルバンチのとき放射光のパルス間隔は210ナノ秒である。このパルス間隔は、TOFにとって理想的な時間幅ではない。BESSYは、800MeVの電子エネルギーで運転されており、最大蓄積電流は通常約800mA、シングルバンチモードで約100mAである。蓄積電流の減衰は速く、約3時間で蓄積電流は半減し、再入射が行われている。入射に要する時間は約10分だが、ときどき長くなるのはどこの施設でも同じかもしれない。リングの運転は、朝7時頃の入射で始まり、夜11時頃の入射で終わる。リングの電流は翌朝まで残っているが、電流値は小さくなるので、実験ができるのは午前3時から4時頃までである。また、祝日には関係なく月曜日から金曜日までリングは運転される。BESSYで実験したときには、朝7時頃から夕方6時頃までの担当と、夕方5時頃から明け方3時頃までの担当の2班に分けて実験を交代した。それゆえ、肉体的には、さほどつらいものではなかった。

FHIからBESSYまでは地下鉄で3駅、車で7分ぐらいの距離である。しかし、研究所からBESSYへ、実験装置、工具、細かい部品はもちろん、論文や書類の入っているキャビネットまで研究室にあるほとんど全ての物を大型トラックで運び込まなければならない。これらの荷物の荷造りは、前日1日かけて行った。電総研では装置がいつもビームラインまたはその周辺に置いてあるので、このまるで引っ越しのような作業は、私にとっては初めてで非常に大変なものであった。大型トラックが去った後はかなりのスペースが研究室に現れ、こんなに広がったのかと思うぐらいである。このとき、我々のグループはビームラインを3本使うため相当の荷物があり、トラックで2往復することが必要だった。装置を運び込んだ後は、装置のセットアップ、さらには真空の立ち上げを行

うが、これをビームタイム毎に行わなければならないのは、相当のパワーが必要だった。

私が使ったビームラインはHE-TGM1で、エネルギーは約200eVから1keVまでの光子ビームを用いる測定が可能である。分解能はスリット幅に依存するが200~400程度で強度は $10^{10}$ ~ $10^{11}$ 程度である。このビームラインは、 $4^\circ$ 上方に傾いているのでセットアップが難しい。

真空について気がついたことだが、真空容器を真空から大気にするとき、ドイツでは、液体窒素を使った。電総研では窒素ポンプを使っていたので、少々戸惑った。

さて、次は1994年6月にハンブルグにあるHASYLABのビームタイムを得た。ハンブルグはベルリンから約300km北西に位置し、車で約3時間で到着する距離である。しかし私はアウトバーンで事故渋滞に遭い、装置が到着するまでに辿りつかなかったので冷や汗をかいた。HASYLABは、DESY (Deutsches Elektronen-synchrotron) の中にあり、DORIS IIという電子蓄積リングからの放射光を利用している。1昨年までは、高エネルギー物理実験との共用リングであったが、現在は放射光利用の専用リングになっている。これは、高エネルギー物理実験用の測定装置が故障し、これを期に修理をしないで実験を終了したためだと聞いた。どこのリングでも状況は同じだと思うが、シングルバンチユーザには、ビームタイムが多く与えられない。この理由の一つは、シングルバンチでは放射光の強度が通常運転に比べ数分の1になることであろう。以前高エネルギー物理実験が行われていたときは、DORIS IIはシングルバンチで運転されていたため、シングルバンチユーザとしては、かなりの時間を使うことができた。しかし現在では、かなり難しい状況になっている。実際、私が使ったときには、夜11時から朝7時までシングルバンチで、その他の時間は2バンチになった。更に悪いことには、この後のビームタイム(1994年10月)のときには、深夜2バンチで、そ

の他は5バンチだった。学生によると通常運転では、5バンチとのことである。放射光のパルス周期は、シングルバンチで960ナノ秒、2バンチで480ナノ秒、5バンチで192ナノ秒である。2バンチならかなり良い実験が出来るが、5バンチでは苦しい。

DORIS IIは、4.5GeVの電子エネルギーで運転していたと記憶している。蓄積電流は1バンチ当たり約30mAである。リングはBESSYに比べてかなり安定しており、約10時間で蓄積電流が半減する。入射に要する時間は通常数分である。DORIS IIは週7日間24時間運転されている。実験のシフトは、午前1時から午後1時と午後1時から午前1時の2交代制で行った。午前1時から午後1時のシフトの時は身体が馴れるのに時間が必要だった。そのため実験は想像以上にきついものであり、3週間続くとかなり消耗してしまった。

遠くから実験に来ているグループのほとんどは、DESY内のゲストハウスに泊まっている。ゲストハウスも混み合っているときは、外のホテルに泊まるしかない。DESY周辺は、ハンブルグの住宅地になっており交通の便も良いが、実験がきついことと、夜間の移動に困るのでゲストハウスに泊まれないと不便である。私が泊まったゲストハウスは、シングル2部屋、ツイン1部屋、リビング1部屋(2つベッドが置かれている)、および台所であった。ここに4人から最高7人が生活することになった。時間が一般の人とずれているため各自がほとんど自炊した。私は、ドイツ人が好むパンやスープにあまり馴染まなかったため、日本食

を持ち込んで何とか生き延びることが出来た。

HASYLABでは、ビームラインは一つだけ与えられていたので、各グループが数日ずつビームタイムを割り当てて実験を行った。基本的には自分の実験に必要な約1週間で良いのだが、実験は1人では出来ないで、他のグループとお互いに手伝うことになる。これは非常によい勉強になった。

私が使わせてもらったビームラインBW3は、3つの交換可能なアンジュレータとSX700超高分解能軟X線分光器を組み合わせたものである。分光器の波長に合わせて、アンジュレータのギャップを変化させたり、アンジュレータを別のアンジュレータに変えても、ビームの状態は全く変化していないように思えるぐらい安定している。このビームラインは最近整備されたもので、非常に明るく、さらに分解能が非常に高い。分解能は、400eVで10,000は越えていたと思われる。この分解能で、 $2 \times 10^{-6}$ hPaのチェンバー内のガス圧力でイオンのコインシデンス実験が出来たのだが、今でも信じられないくらいだ。

2ヶ月の語学研修期間を含め1年2ヶ月の短い期間であったが、有意義な実験と貴重な経験ができ、ベルリン滞在は非常に実りあるものであった。今回の渡航に際し、ドイツでは、Becker教授(FHI)、外林教授(FHI)、日本においては、籾野教授(東工大)、小谷野教授(姫路工大)、鈴木研究室長(電総研)、清水企画室長(電総研)ら多くの方々に大変お世話になった。この場をおかりして感謝の意を表したい。

