

# 荷電粒子検出のための3次元(空間・時間) 検出系利用技術の構築

## 1. 研究組織

- 為則 雄祐 (JASRI)  
2次元検出システム開発・テスト
- 大橋 治彦 (JASRI)  
2次元検出システム開発・テスト
- 鈴木 昌世 (JASRI)  
2次元検出システム開発・テスト
- 豊川 秀訓 (JASRI)  
2次元検出システム開発・テスト
- 大浦 正樹 (理研)  
2次元検出システム用ソフトウェア開発・テスト
- 斎藤 則生 (産総研)  
2次元検出システム開発・テスト
- 上田 潔 (東北大)  
2次元検出システム開発・テスト
- 塚本 一徳 (筑波大)  
2次元検出システム用ソフトウェア開発・テスト
- 寄林 豊 (豊伸電子)  
高速TDCモジュール開発

## 2. 研究開発の目的

軟X線分光測定における実験手法は多種多様であるが、実際に検出対象となっているものは、電子・イオンあるいは光子である。中でも、エネルギーが比較的低い軟X線領域では、その大部分がオージェ過程を経由して非輻射的に緩和するため、観測対象となる生成物は電子あるいはイオンとなる。生成した電子・イオンは、さまざまなタイプの電子分析装置あるいはイオン質量分析装置によってこれまでも観測され、内殻励起状態や緩和・解離過程などが詳細に研究されている。いずれも内殻励起過程について重要な情報を与えてくれるが、複雑な内殻励起ダイナミクスの全体像を明らかにするためにはそれだけでは十分ではない。イオン化のイベントが一秒間に数十万回よりも少ない放射光励起実験の場合、それらを明らかにする最も有力な手法の一つは、飛行時間型分析器等を用いた同時計数法であろう。同時計数法では、一回の内殻励起イベントにより生成する複数の生成物を同時に検出し、個々の電子やイオンの情報だけでなく、それらの間の放出角度・運動量等の相関を詳細に観測することができる。それにより個々のイベントを詳細に観測できるため、内殻励起過程の全体像について、より緻密な情報を得ることができる。また、近年では同時計数法を応用することにより、分子の空間的配向

を規定した測定も行われるようになってきている。

同時計数法自体は20年程前から原子・分子の研究分野においても適用が開始され、複雑な内殻励起過程の研究手法としての有用性はすでに知られている。さらに、近年の高輝度光源や分光技術の進歩はより緻密な同時計数測定を可能とし、その重要性は益々高まっている。同時計数測定の発展を支えているもう一つの技術的要因は、特に2次元検出器の発展による測定器側の進歩である。これまでの電子やイオンの分析装置では、チャンネルトロンやシングルメタルアノードを備えたMCPを検出器として備え、電子やイオンの“総量”の検出にとどまっていた。そういった分析装置が位置敏感型検出器を備えることにより、検出器上の位置情報からエネルギー・放出角度といった情報をも同時に得られるようになり一回の測定から得られる情報量が飛躍的に増大した。現在では、位置敏感型検出器を装備した測定装置が主流となりつつあり、測定装置の世代交代が急速に進んでいると言っても良い。しかしながら、一部のメーカーより特定の測定装置に対しては位置敏感型検出器が完成度の高いシステムとして提供されているものの、時間分解能・位置分解能・カウントレート・多重計測などユーザーからの個別の実験に対する要求すべてに満足を与え位置検出システムは存在しないか、あるいは相当高価なものとなる。利用者が位置敏感型検出器を使用するためには、利用者自身がそれをを用いた最適の計測システムを構築しなければならないが、今のところ誰もが簡単に位置敏感型検出器を測定ツールとして活用できるほどシステムとして完成していない。本プロジェクトは、主として放射光励起による電子・イオンの多重計測実験において、位置敏感型検出器を利用するために不足している機器の開発を行うとともに、さらには位置敏感型検出器を多様な分光測定装置において簡便に使用するための利用技術の確立を目指すものである。

## 3. 活動状況

位置敏感型検出器を用いた利用技術を開発するに当たって、BL27SUにユーザー持ち込み装置として設置されている反跳イオン運動量分析装置(以下、3D-TOF)をベースとして研究開発を行うこととした。本装置は、2つのディレイライン型位置敏感型検出器(以下、PSD)を電子・イオンの検出器としてそれぞれ備えた飛行時間型分析装置である。超音速分子線で供給される試料ガスに軟X線を照射し、生成した光電子とイオンを飛行管の両端に設置されたPSD

によりそれぞれ検出する。各ディレイラインから得られる2本の信号線は、差分アンプを通してCFDで信号を整形した後TDCに入力し、最終的に位置情報に変換される。また、電子・イオンそれぞれの飛行時間を測定するために、MCPからの信号も同時にTDCに入力される。TDCのストップ信号は、入射光のパンチ信号を遅延したものを入力する。3D-TOF装置では、位置敏感型検出器としてRoentdek社製ディレイライン型検出器を採用している。位置敏感型検出器にはWedge&Stip型など異なったタイプのもも存在し、中には位置分解能はディレイライン型よりも優れているものもあるが、多重計測測定への適応性を重視し、位置分解能は落ちるがディレイライン型検出器が使用されている。また、Roentdek社からは、同社製検出器を使用するためのエレクトロニクスや解析プログラムも付随し、汎用的なシステムとして供給されている。しかしながら、BL27SUにて行われる測定に対して性能が不足している部分があるため、それらを改良することからプロジェクトがスタートした。特に、TDCの時間分解能の不足が位置分解能に影響しているため、本プロジェクトではまず、高い時間分解能のTDCの開発から着手した。

### 3-1 CAMACモジュールを用いた多重コインシデンス計測システムのテスト

BL27SUにおける測定に必要なスペック全てを満たすことはできないが、既存のCAMACシステムを用いることにより、時間分解能を向上させた測定を行うことは可能である。そこで、CAMACを用いて時間分解能を向上させたシステムと、既存のRoentdek社製TDCを用いて同様の測定を行い、時間分解能の向上が測定に与える影響を調べた。

実験は、BL27SUにおいて先に紹介した3D-TOFを用いて行った。CO<sub>2</sub>のO1s 遷移エネルギーにおいて水平偏光の軟X線を照射し、放出された光電子とイオンの角度分布を測定した。入射光のパンチ信号とコインシデンスした光電子側MCP信号（イオン化イベントの発生信号）をTDCのStart信号として入力し、イオン側MCP信号をStop信号として同様にTDCに入力することによってイオンの飛行時間を測定した。光電子の飛行時間は、光電子側MCPの信号をStart信号とし、光電子を生成したパンチの次のパンチ信号をStop信号として入力し、パンチ間隔との差分をとることにより測定した。PSDからの信号は光電子・光イオンそれぞれの位置情報に変換される。イオンの位置情報はTOFからの時間情報と併せて運動量分布を求め、解離前の分子の空間的配向を決定するために用いられる。また、それぞれの分子軸に対して光電子の放出角度を決定することで、分子軸を固定した光電子の角度分布を求めた。

実験では、従来使用していたTDCとCAMACシステムによる高分解能TDCを用いた測定を同時に行いその性能

を直接比較した。PSDからの信号を処理するTDCの時間分解能は一桁向上しているため、空間分解能もそれに対応して一桁向上することが期待されたが、残念ながら、実験データに顕著な改善は見られなかった。原因としては、光電子を捕集する磁場条件の最適化、放射光ビームの焦点位置と測定装置の位置の最適化等の調整が十分でなかったことが考えられる。また、カウントレートについては、従来のTDCを用いたシステムと比較して、CAMACシステムでは4倍信号強度が強かった。両測定は同時に実行したので、測定条件は全く同じであったことを考慮すると、CAMACシステムを用いると、測定レートが4倍程度向上するという結果が得られた。

### 3-2 新型TAC-TDCモジュールの開発

現在入手可能である最も速いチップ（レクロイ製F1チップ；時間分解能50ps）を用いたTDCも、時間スケールは本実験の必要スペックである40μsには満たない。我々が必要とするスペックを全て満たす既製品のTDCは存在しないため、TACとカウンターを組み合わせた新しいタイプのTDCモジュールの開発を行った。

新型モジュール（以下、TAC-TDCモジュールと呼ぶ）は、100MHzの水晶発振器と12ビットのカウンターから構成される＜広域測定部＞と、2台の時間波高変換器（TAC）からなる＜狭域測定部＞から構築される。広域測定部では、水晶発振器から発生される10ns周期のクロックを12ビットカウンターにて計数することにより、40μsという広い時間領域を測定することができる。また、広域測定部が測定できない10ns以下の時間領域は、TAC-ADCにて測定することにより、広いエネルギー領域を高い時間分解能で測定することを可能にしている。

TAC-TDCモジュールのタイミングチャートを図1に示す。モジュールに入力された信号は、1台目のTAC（TAC-start）とカウンターにスタート信号を与える。入力信号によりスタートしたTAC-startは、その後に発生する最初の水晶発振器からのクロック信号により計測を停止する。すなわち、モジュールにスタート信号が入力されて

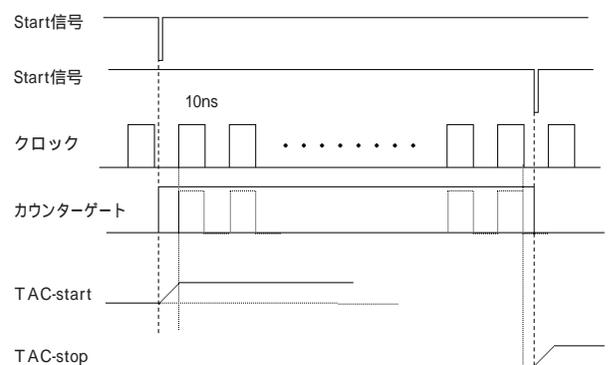


図1 TAC-TDCモジュールのタイミングチャート

から、最初的水晶発振器からの信号が発生するまでの時間をTAC-startは計測する。また、入力されたストップ信号は、ストップ信号入力された後最初に発生するクロック信号との時間差をTAC-stopにて計測し、水晶発振器からのクロック信号の間隔（10ns）との差分をとることにより、ストップ信号と最後のクロックとの時間差を計測する。従って、スタート信号が入力してからストップ信号が入力するまでの全時間は、2台のTACが計測した時間と、カウンターが計測した時間の和で得られることになる。原理的には、最小時間分解能は狭域測定部であるTACからの信号を変換するADコンバータで決定される。本モジュールでは12ビット逐次比較型ADコンバータを用いることで、50psの時間分解能を目指している。

その他の仕様として、6ヒットのマルチストップ機能を実現するために、1つの入力信号に対して6台のTAC-startを配置した。TAC-startに入力されるスタート信号は1台のフリップフロップを経由して入力されるようになっており、各チャンネル間での計測時間差が生じ無いようにしている。また、6台のTACは全て一つのストップ信号で停止でき、同時計数実験においてコモンストップ機能を利用することが可能である。また一台のモジュールには、上記の仕様のTAC-TDC回路を2チャンネル装備している。インターフェースはCAMACを採用し、制御関数については既存の3D TOF装置での本モジュールの使用を考慮して決定した。

現在、モジュールと制御用ソフトの開発中である。2003A期間のビームタイム時に放射光を用いたテストをBL27SUにて行う予定になっている。また、本モジュールの利用が可能となると、カウントレートが向上し測定データファイルが巨大化することが予想されるため、データファイルサイズの小さくなる記録方法や解析方法を開発する等、計測システムとして最適化してゆく必要がある。初年度は開発対象とはしていないが、検出器自身もディレイライン型検出器の使用が最適であると結論することはできない。2年目以降も引き続きTDCの開発・テストを行うとともに、検出器など初年度は着手しなかったものについても検討を進め、2次元検出器を電子・イオンといった粒子計測システムとしてより有効に活用するための開発を行う予定である。

利用研究促進部門

分光物性 グループ・軟X線チーム

為則 雄祐