

多価冷イオンプロジェクト 事後評価報告書

<評価委員>

市川 行和（宇宙科学研究所 教授）
加藤 隆子（文部科学省 核融合科学研究所 教授）
小林 信夫（東京都立大学 理学部長）
持地 広造（日立製作所 中央研究所 主任研究員）

1. 研究の内容

本研究は、高エネルギー・高密度の電子ビームを用いて多価イオンを生成するとともにそれを長時間保持する装置（EBIT）を製作し、それにより

- （1）多価イオンの精密分光
- （2）電子と多価イオンの衝突過程の研究
- （3）多価イオンと固体表面の相互作用の微視的理解

を行うことを目的とするものであった。

まず、上記の目的を達成するために、可能な限り装置の高性能化がはかられた。できるだけ多価のイオンを生成するためには、電子ビームのエネルギーを上げるとともに、閉じ込め時間を長くする必要がある。電子ビームのエネルギーは最終的に 200 keV に達した。これは Bi ($Z=83$) までの原子を裸にすることが可能である。また精密実験のためには、生成されたイオンの熱エネルギーを下げる（冷却する）必要があるが、強制的蒸発冷却法と呼ばれる新しい手法を用いて、イオンの価数当たり 10 eV 程度にまで冷やすことができた。これらの性能は現在世界最高であり、他所では不可能な研究を可能にした。このような性能を実現するためにはいくつかの新しい装置技術が開発された。たとえば、大電子流密度を得るために新たな電子銃が作成されたが、その際にはカソード材料の開発から行わねばならなかった。

次に本装置を用いて行われた研究について要約する。まず強調すべきことはこれらはすべて本装置でなくてはできない研究であり、その意味でも国際的に高い水準にあるものである。

（1）多価イオンの精密分光

多価イオンの一つの特徴は束縛電子に対する強いクーロン場により、相対論効果や量子電磁気学（QED）効果が顕著に現れることである。このことは理論的にはこれまで知られていたことであるが、実験的検証は困難であった。本研究ではいくつかの等電子系列イオンについて原子番号 (Z) を変化させて実験を行い、上記の効果の系統的研究を行った。また、H様、He様多価イオンについて精密分光を行い、QED効果を明らかにした（たとえば Rh^{44+}

の 1s ラムシフト)。これらのイオンを生成することは他の装置でもできるが、冷却し長時間閉じ込めることで、他では不可能な精密分光を可能にしたものである。

(2) 電子と多価イオンの衝突過程

特に、これまで他の装置では困難であった衝突過程について、断面積の測定を行った（たとえば、鉄の水素様イオン（25 価）のイオン化過程）。これは宇宙や実験室にある高温プラズマの研究に基礎データを提供するとともに、これまでなされてきた理論的研究を検証する機会をあたえる。

(3) 多価イオンと固体表面の相互作用

EBIT で生成された多価イオンを引き出し、固体表面に当ててその微視的構造変化を観察した。従来よりも多価のイオン（たとえば Xe の 44-52 価）を価数を選別して、しかも低いエネルギーで表面に当てることが可能であり、一個の多価イオンによるナノスケールの構造変化を観測することができる。これは今後表面加工などに応用される際の基礎的知見となる。

2. 研究成果の状況

本研究の成果は 80 編を越す原著論文として発表されている。また、口答発表も多数に上っているが特に国際会議における招待講演が多い。これはそれだけ国際的に注目されていることを示す。前節でも触れたが、本研究の目的を達成するにはいくつかの極限的な技術が必要であった（高エネルギー・高密度電流の安定な発生・維持、高電子流密度を実現するための電子銃、引き出したイオンを減速する手法、など）。また観測手法についても、高エネルギー X 線にまで感度のある新しい結晶分光器を開発するなど、種々の工夫がこらされた。これらは今後、同種の実験のみならず関連分野の発展にも貢献するものと考えられる。

3. 研究成果の科学技術への貢献

本研究の成果は、それ自身物理学の基本的問題（たとえば、強いクーロン場中の QED 効果や電子相関と相対論・QED 効果とのからみ合いなど）の解明に新たな知見を与えるものであるが、他の科学技術分野に対しても大きな波及効果がある。

(1) 多価イオンは高温プラズマの主要な構成要素であり、その物性や電子あるいは他の粒子や固体表面との相互作用に関する基礎的知識は高温プラズマの理解に不可欠である。本研究の成果は宇宙や核融合装置の研究、あるいは X 線レーザーや多価イオンビームを用いる医療技術の開発などにきわめて重要な（他では得られない）基盤情報となる。

(2) 多価イオンと固体表面の相互作用についてここで得られた知見は、イオンの持つ大きなポテンシャルエネルギーを利用して、局所的に表面を改変する可能性を示唆している。多価イオンの多様性を考慮し、それを自在にコントロールできれば、新たなナノスケール表面技術として発展するものと期待される。

なお、本研究の科学技術への貢献として、若手研究者の養成があげられる。本研究は大学との密接な協力のもとに行われたが、他では得られない研究環境を活かして大学院生の教育に寄与した（たとえば、2名の学生が本研究により博士号を取得した）。また本研究に直接参加した若手研究者の活躍は高く評価されており、貴重な人的資産が形成されたと考える。

4. 相手機関との研究交流状況

本研究の国際共同研究として特徴の一つは、双方に多価イオン生成装置があり、その性能が相補的であるため、実験を分担することで幅広く多価イオンの研究ができたことである。また、技術の交流や人的交流も盛んに行われ、結果として優れた共著論文がいくつか発表された。第二の特徴は、双方の研究機関の性格の違いである。日本側は研究に重点が置かれ、英国側は原則的に教育機関であった。このため、当初は共同研究が必ずしも円滑に進まなかったようであるが、日本側からの研究者の派遣など積極的な働きかけによって実質の伴った共同研究に進展した。また、このことは、日本側の若手研究者の実力を高く評価されるきっかけともなり、その証拠として、複数の研究者がプロジェクト終了後相手先研究機関にポストを得ている。

5. その他

以上述べた通り、本プロジェクトは多くの成果を挙げ、成功であった。ここで完成した実験装置は多価イオンの研究に幅広く使用することが可能である。ただ、ここでなされた研究には、いまだその緒に付いたばかりであり、今後の研究を続けることで基礎的にも応用的にも大きな発展が期待されるものが少なからず存在する。さらには、今までに無いまったく新しい研究領域が拓かれる可能性も予見される。本研究が、その規模は縮小するとしても、今後ともなんらかの形で継続されることを希望する。