

多価イオンビームのエミッタンス測定

中村研究室 渡辺越至

背景と目的

多価イオンとは多数の電子が剥ぎ取られた高電離イオンのことである。多価イオンは膨大なポテンシャルエネルギーを有し、固体表面に衝突させると表面上のナノスケール領域の構造を変化させる。その相互作用をナノテクノロジー分野に応用しようとする試みが多く、我々も Tokyo-EBIT(Electron Beam Ion Trap)と呼ばれる装置を用いて、多価イオンと固体表面との相互作用研究に取り組んでいる。多価イオンと固体表面との相互作用をナノテクノロジーなどに応用する場合、その効率をあげるためには広がり少ない良質な（絞られた指向性の良い）多価イオンビームが必要となるが、我々が利用している Tokyo-EBIT からの多価イオンビームの性質はこれまでに詳しく調べられたことがなく、あまり良くわかっていない。そこで本研究では、ビームの性質を知るためにエミッタンスの測定を行った。エミッタンスはビームの広がりや指向性などに関連する性質を表すのに使われる量で、その値を知ることは今後の実験計画において有用である。

原理

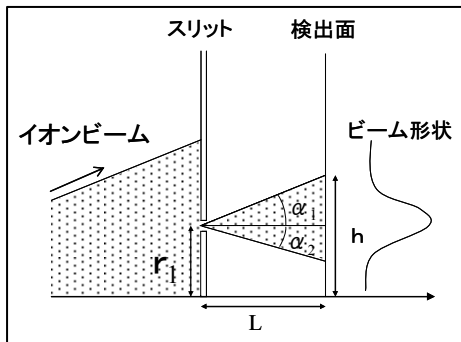


図1. エミッタンスの測定法

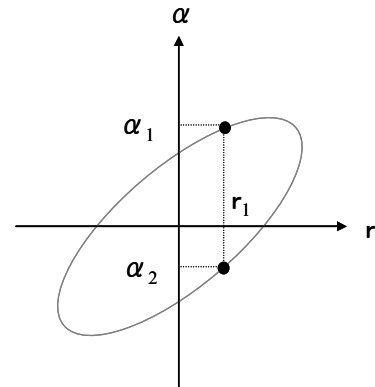


図2. エミッタンス図

エミッタンスとは、ビームの進行方向に対して垂直な方向の位置を横軸に、軌道の広がり角を縦軸にとった二次元の位相空間における面積として定義される。エミッタンスの値が小さいほど広がりの少ない質のいいビームであると言うことができ、リウビルの定理(Liouville's theorem)よりビーム行路中のどこで測っても一定であることが知られている。測定原理を図1に示す。測定対象のビームをスリットで区切り、適当な距離をおいて到達ビームを検出する。スリットのビーム軸からの位置 r 、検出面での軸からの位置 h 、スリットから検出面までの距離 L より広がり角を α とすると $\alpha \simeq (h-r)/L$ と表される。スリッ

トの位置 r を変えて測定を繰り返し、得られた値を横軸 r 、縦軸 α にとった位相図上にプロットすると図2のような閉曲線が得られる。このような図をエミッタンス図と呼び、この閉曲線の面積がエミッタンスとなる。本実験では、スリットの位置を変えずに測定するために多段型のスリットを用いた。

実験

実験装置の模式図を図3に示す。イオン源から引き出したビームを静電レンズで発散を防ぎながら導き、静電偏向器における電場で90度曲げ、スリットに通した。スリットは幅0.1mm、間隔0.5mmの21本で、検出器としては検出面25mm、位置分解能0.25mmの位置有感型検出器を用いた。また、スリットから検出面までの距離は500mmとした。

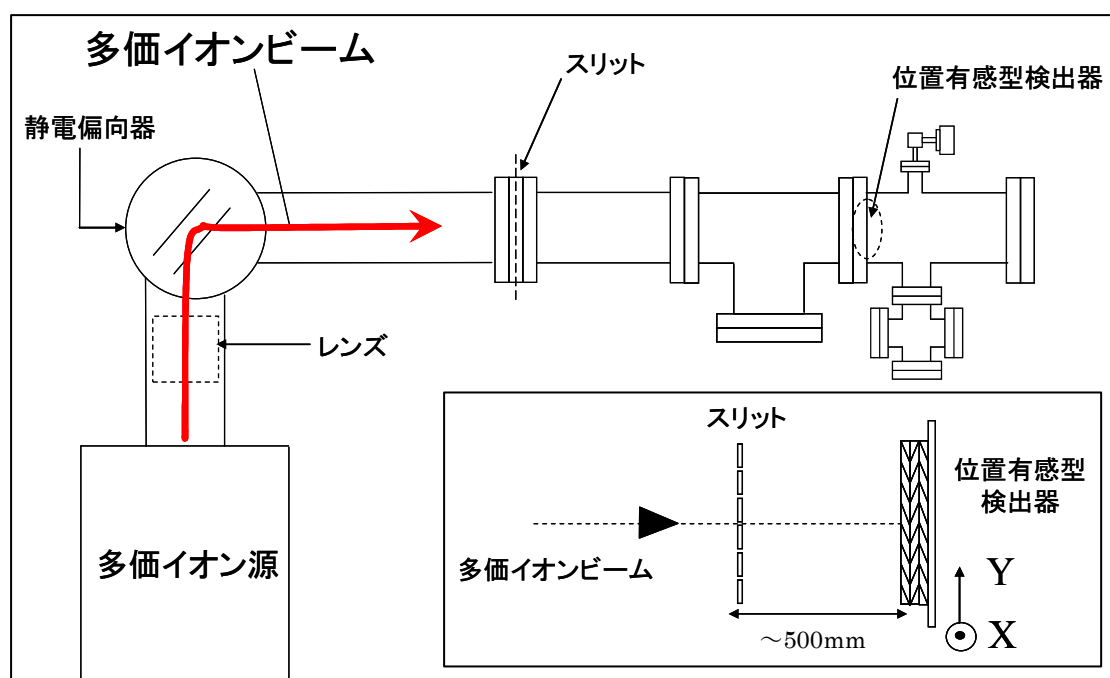


図3. 装置の模式図

結果

スリットを通り抜けたイオンビームの検出器上でのイメージと、それを X 軸方向に積算したビーム強度分布を図4に示す。今回の測定からまず分かったことは、ビームが軸対称ではなく、Y方向つまり偏向器の偏向方向に長い形をしたビームになっていることである。大きさはおよそ $12\text{mm} \times 4\text{mm}$ でありレンズや偏向器を用いて調整しても、その形状は本質的には変わることはなかった。また、得られた画像をよく見るとそれぞれのスリットから出たビームの像が2つに分かれていることがわかる。この原因が今回立ち上げた測定装置によるものでないことを確かめるため、市販のイオン銃からの1価イオンビームを用いて測定装置の試験を行った。その結果を図5に示す。このようにイオン銃による試験ではそれぞれのスリットから出たビームの像が2つに分離するというのではなく、測定装置には

特に問題がないことが確認できた。つまり今回の測定から、Tokyo-EBIT からの多価イオンビーム自身が少なくとも2成分から成っているということがわかった。

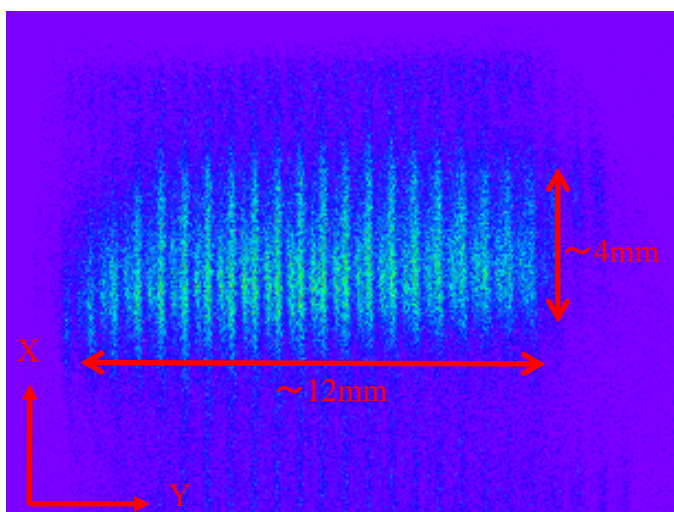
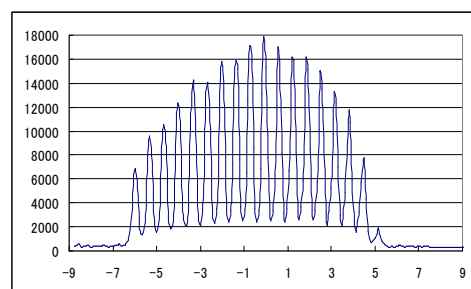
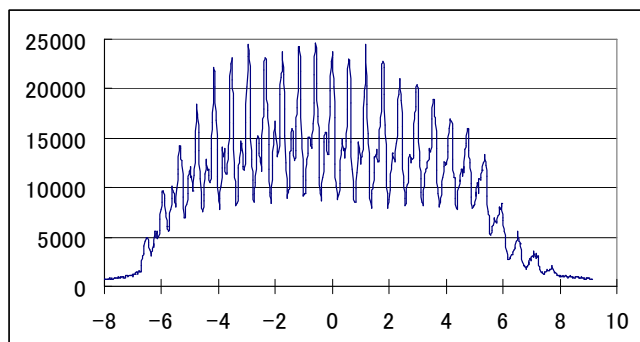


図4. 多価イオンでの測定結果

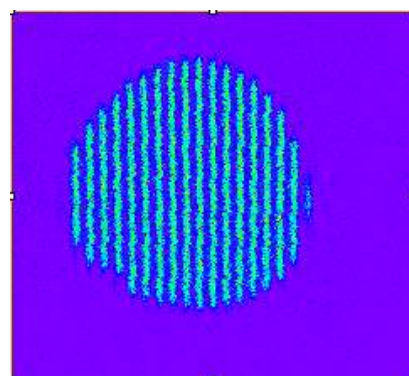


図5. 1価イオンでの試験実験結果

次にエミッタンスを求めるため、それぞれのスリットを抜けたビームの像から広がり角を求め、位相図にプロットした。それを図6に示す。横軸が位置 r 、縦軸が広がり角 α となっている。原理的にはこの閉曲線の面積がエミッタンスとなるが、縦軸つまり角度広がりには検出器の位置分解能がたたみこまれていることを考慮する必要がある。残念ながら今回、ビームの広がり角が予想していた以上に小さく、検出器の位置分解能が妨げとなって、ビーム本来の広がり角を正確に評価することができなかったが、位置分解能を考慮すると、ビームのエミッタンスが $1 [\text{mm mrad}]$ 程度あるいはそれ以下であると考えられる。

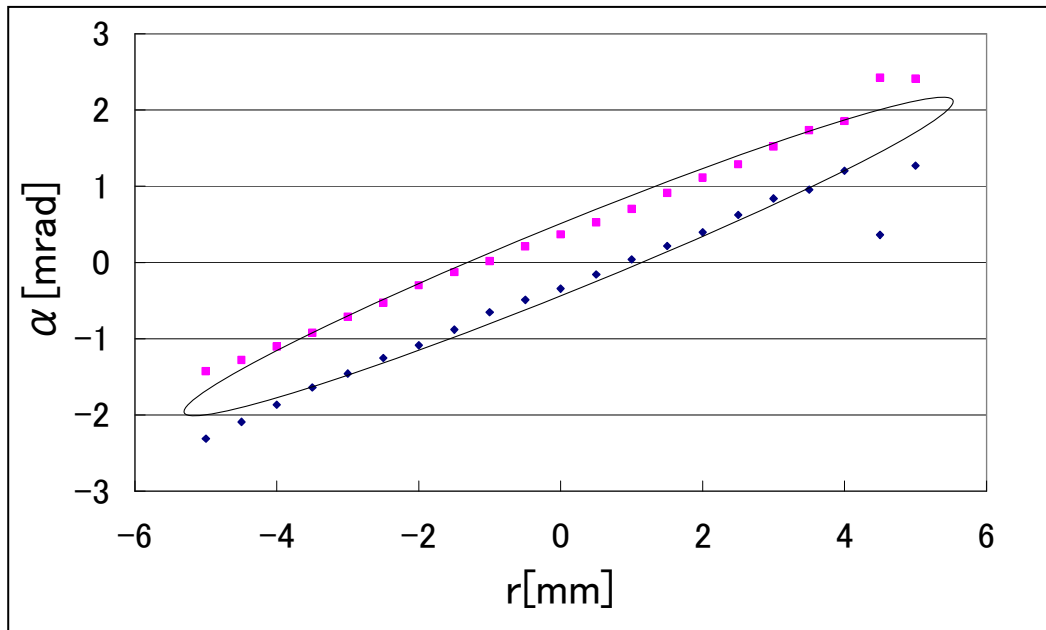


図6. 位相図

まとめ

多価イオンビームのエミッタンスが1 [mm mrad]程度であるとわかった。また、ビームが2成分を持ち、軸対称でないことがわかった。これは今回の測定が価数非選別で行われたことが原因の1つではないかと考えられる。

今後の課題

ビームがなぜ2成分を持つかを解明するために価数選別ビームでの測定や2次元的なエミッタンスの測定を行いたい。また、より精度よくエミッタンスを求めるためにスリットと検出器との距離を伸ばすなど測定装置の改良をしていきたい。