

# 水素様多価イオンにおける1sラムシフトの測定

大谷・山田研究室 中原哲郎

## 1. 研究目的

多価イオンとは、一般に価数が二個以上の正・負イオンのことを指すが、我々が興味を持っているのは、残っている電子の少ない裸に近い正の重元素多価イオンである。このような多価イオンに束縛されている電子は、原子核の近傍を、その強いクーロン場を感じながら、光速に近い速度で運動しているため、相対論的效果や量子電磁気学的効果などが顕著にあらわれる。それらの効果の一つにラムシフトがある。もともとラムシフトとは、水素原子における $2s_{1/2}$ と $2p_{1/2}$ の準位の分裂ことを指すが、より広義には、点電荷に対するディラック方程式の解と、現実の準位エネルギーの差を指す。例えば、1s準位のシフトを1sラムシフトという。ラムシフトは、主に量子電磁学的効果によりもたらされる。量子電磁気学的理論においては、ラムシフトは次の式のように表される。

$$S = \frac{\alpha}{\pi} \frac{(\alpha Z)^4}{n^3} F(\alpha Z) m_e c_0^2 \quad (1.1)$$

そこでの $F(Z)$ はラムシフトの異なる効果の足しあわせであり、 $Z$ に対して、鈍感に変化する。そのため、ラムシフトの大きさは、原子番号のおおよそ4乗に比例して大きくなり、例えば、水素原子では、 $3.38 \times 10^{-5} \text{eV}$ であったものがウランの水素様イオンでは $470 \text{eV}$ という<sup>[1]</sup>、非常に大きな値となる。したがって、原子番号の大きな元素について、ラムシフトの値を調べることは、強いクーロン場での量子電磁気学効果を検証するうえで非常に重要である。

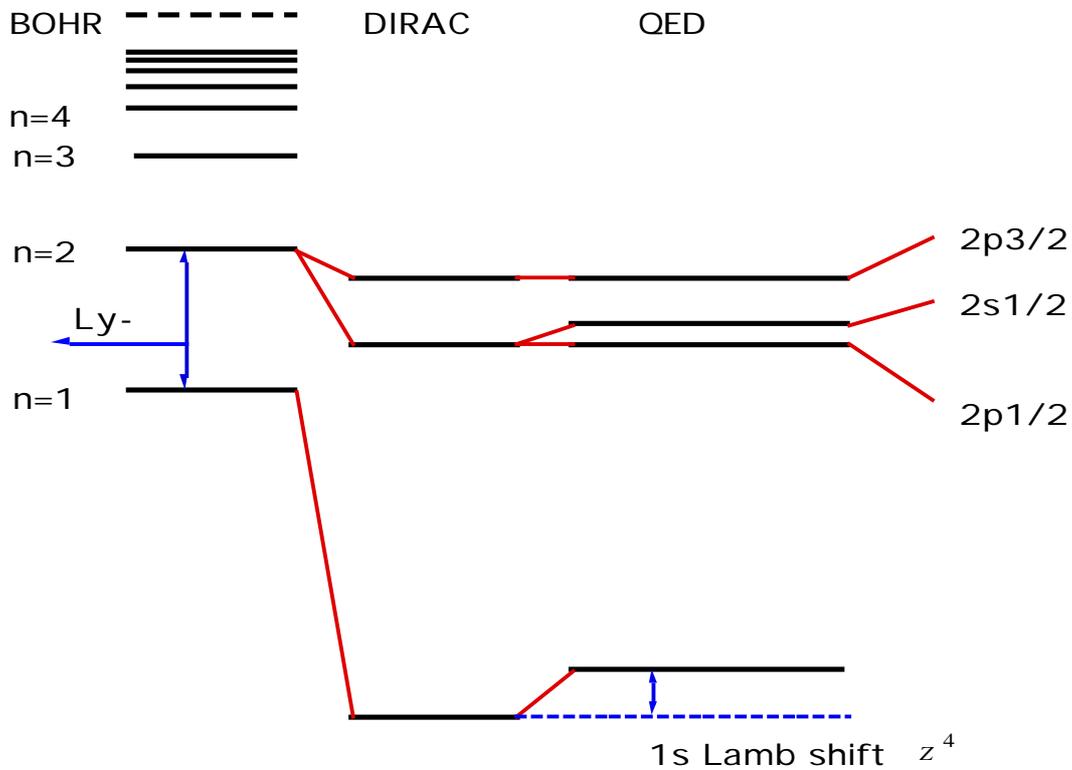


Fig1.1 水素様イオンエネルギー準位図

## 2. 電子ビーム型イオン源(Electron Beam Ion Trap)

多価イオンの生成方法には、加速器を用いる等多くの方法があるが、私達は、レーザーセンターに設置されているTokyo-EBIT<sup>[2][3]</sup>と呼ばれる、電子ビーム型イオン源(EBIT)を用いている。このEBITは、多価イオンの生成を行い、長時間にわたる閉じこめが可能である。このEBITは、次のような原理で多価イオンを生成する。イオンの生成には、電子ビームを使い、電子をイオンに衝突させ、一つ一つ電子を電離していく。電子ビームはイオンの電離の効率を上げるため、超伝導コイルにより圧縮され、電流密度を増加させている。多価イオン生成のためには長時間にわたる、イオンの閉じ込めが必要なので、電子ビームの軸方向の、ドリフトチューブと呼ばれる三つの電極を用いた、静電的な井戸型ポテンシャルによるトラップにより、トラップ領域にイオンが集まるようにしている。そして、電子ビーム自身の空間電荷ポテンシャルを用いた、動径方向のトラップを設けて動径方向の中心にイオンが集まるようになっている。

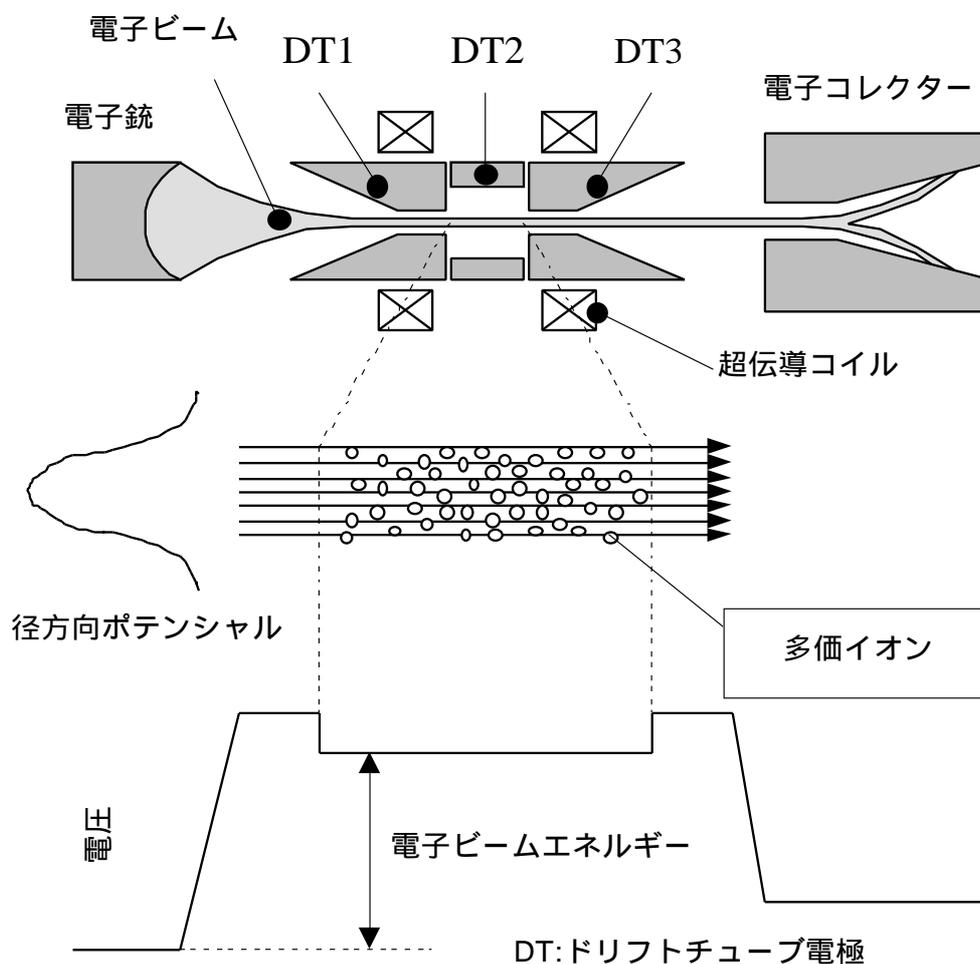


Fig 2.1 EBIT模式図

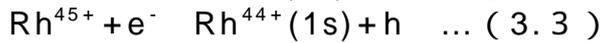
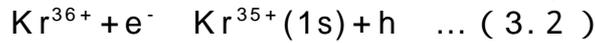
## 3. 実験概要

今回、EBIT内で起こっている放射性再結合過程を観測することにより、水素様  $Rh^{44+}$  の  $1s$  ラムシフトの測定を行なった。EBIT内では、トラップされた多価イオンと、単色の電子ビームが絶えず相互作用し、放射性再結合などの衝突過程が起こっている。放射性再結合過程とは、自由電子が多価イオンの空の軌道に捕獲され、その際に自由電子の持っていた運動エネルギーと自由電子の束縛された準位の束縛エネルギーの和の光子を放出するというものである。裸イオンの空の  $1s$  準位への放射性再結合過程では、(3.1)式のように電子ビームエネルギー

従って、電子ビームエネルギーが分かっているならば、放射性再結合X線のエネルギー  $E_{RR}$  を測定することで1sエネルギーが分かる。

$$E_{RR} = E_e + E_{1s} \dots (3.1)$$

しかしながら、EBITにおける電子ビームエネルギーの値は、電子ビーム自身の空間電荷やトラップされた、イオンの空間電荷等にも影響を受けるため、その絶対値を正確に知ることは一般にそう容易ではない。そこで我々はエネルギー準位の良く分かっているKr多価イオン<sup>[1]</sup>を同時にトラップし、そのX線領域の二つの放射性再結合過程(3.2)と(3.3)を同時に測定した。



これらのX線のエネルギー差は(3.4)、(3.5)式のようにそれぞれのイオンの1s束縛エネルギーの差に相当することになる。

$$E_{RR}^{Kr} = E_e + E_{1s}^{Kr} \dots (3.4)$$

$$E_{RR}^{Rh} = E_e + E_{1s}^{Rh} \dots (3.5)$$

つまり、二種のイオンに対する放射性再結合を同時に観測することにより、(2.2.6)式のように電子ビームエネルギー  $E_e$  の値を相殺させることができる。

$$E_{1s}^{Rh} - E_{1s}^{Kr} = E_{RR}^{Rh} - E_{RR}^{Kr} \dots (3.6)$$

Krの1s束縛エネルギーは精密に測定されているので、その値を用いて、Rhの1sエネルギーを知ることができる。

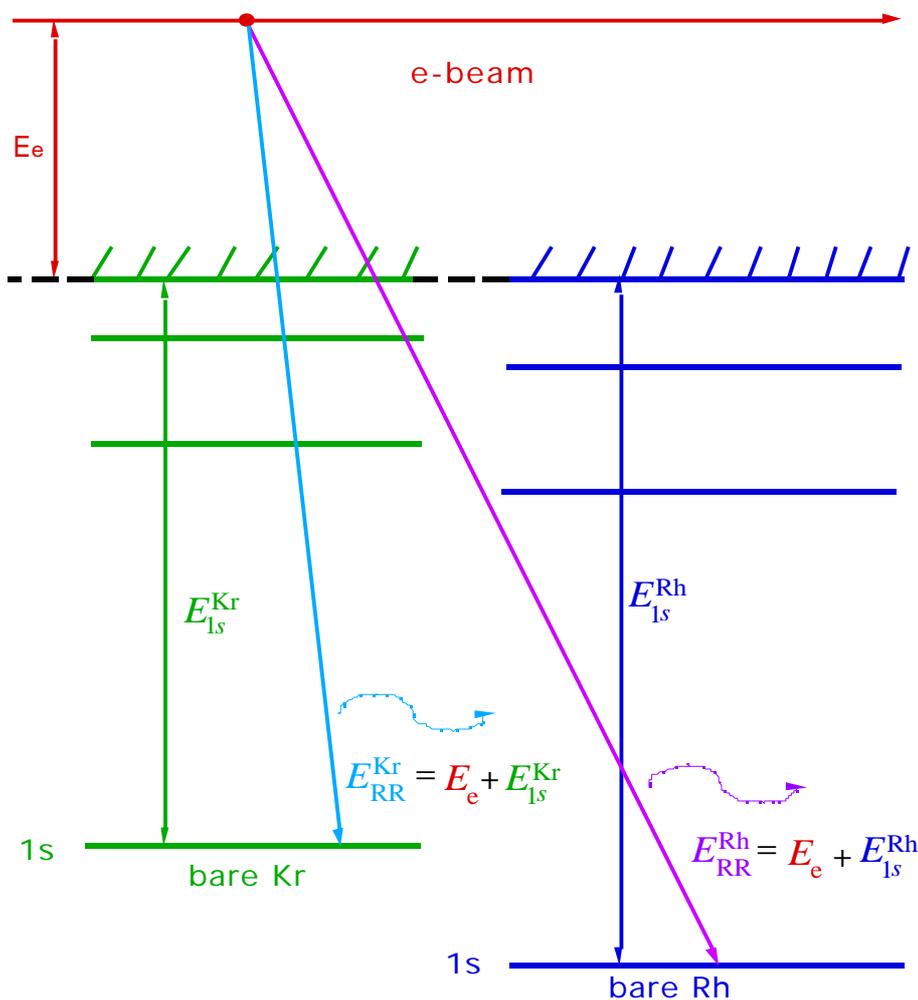


Fig 3.1 放射性再結合模式図

#### 4.実験配置

Fig4.1に今回の実験の装置の模式図を示す。装置のEBITにクリプトンガスとRhイオンを同時に導入し、それぞれの裸イオン $Kr^{36+}$ と $Rh^{45+}$ を生成・トラップする。Krガスは、電子ビームと垂直方向に設置された気体導入器から、Rhイオンは電子ビーム下流上方に設置された真空アーク型イオン源からそれぞれ導入する。そして、放射性再結合により生じるX線を、直径50ミリ、厚さ1ミリのBe窓を通してGe検出器で観測する。検出器の前には、 $^{57}Co$ と $^{109}Cd$ を置き、それらからの線により、X線エネルギーを較正する。また、RhやKrの特性線が検出器のパイルアップを起こさないよう0.3ミリのアルミ箔を検出器と窓の間に置いた。今回、電子ビームエネルギーは、75keVと106keVの2点で計三回の測定を行った。

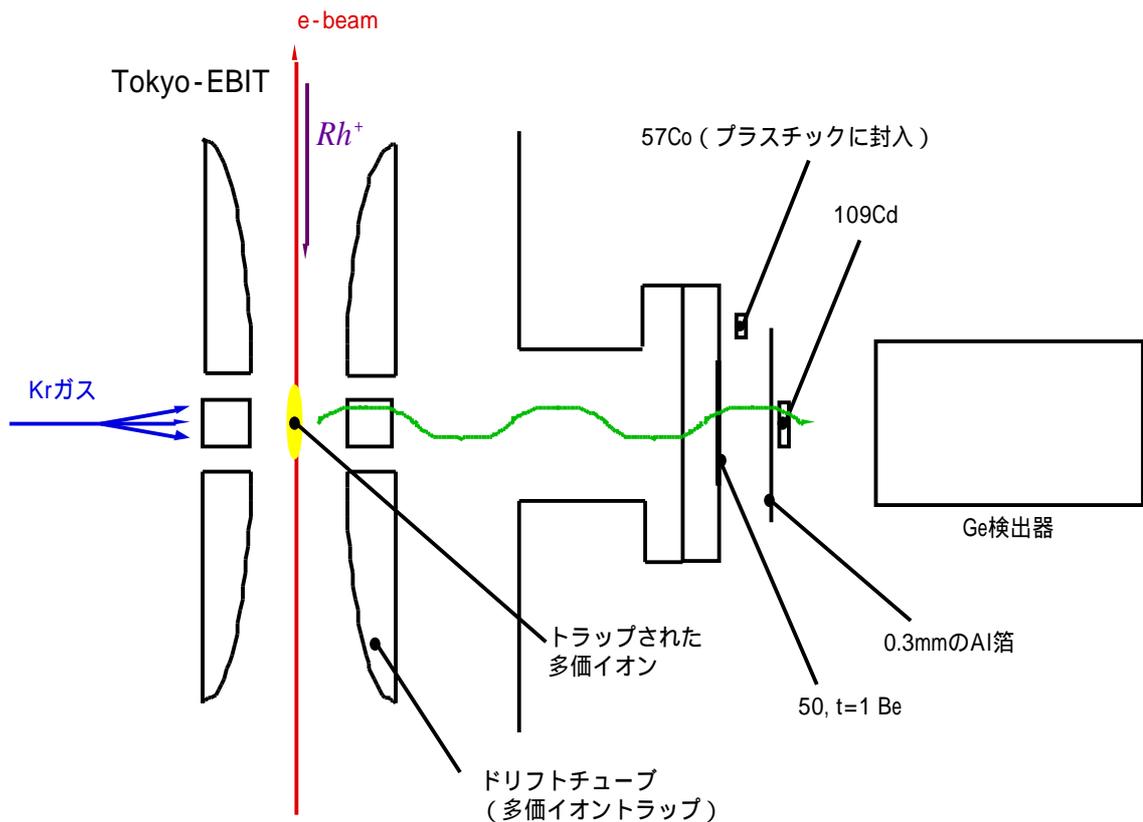


Fig 4.1 実験模式図

#### 5.スペクトル図

例としてFig4.5に電子ビームエネルギー107keVにおいて得られたスペクトルを示す。122keVと136keVの位置にリファレンス( $^{57}Co$ )の線があり、その間、左側がKr、右側がRhへの放射性再結合によるX線である。それぞれ、ピークが2つあるが、右側が裸イオンの1sへの放射性再結合、左側が水素様イオンの1sへの放射性再結合により生じるX線に相当する。今回の測定において興味があるのは、Fig4.5で $(E_{RR}^{Rh} - E_{RR}^{Kr})$ と示した値であり、これにより水素様Rhの1s束縛エネルギーが求まる。電子ビームエネルギー75keVにおいては、リファレンスとして、 $^{107}Cd$ と $^{57}Co$ を用いており、それぞれ、88keVと122keVの位置にピークが現れる。

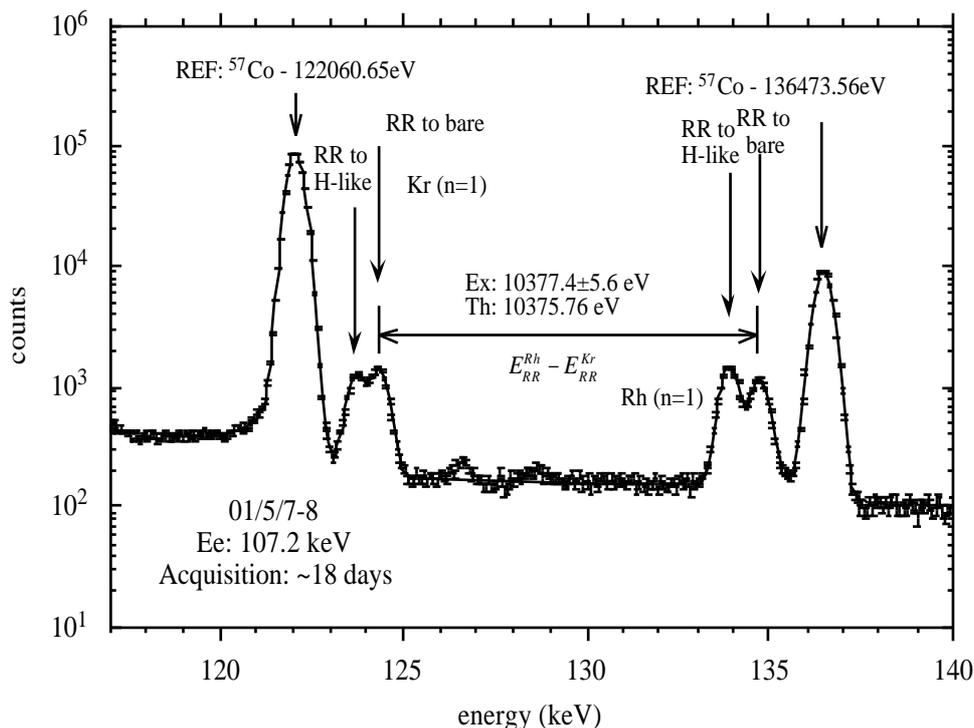


Fig5.1 電子ビームエネルギー107keVにおいて得られた放射性再結合スペクトル

得られたスペクトルに対してテイルを考慮した、正規関数によってあてはめを行い、各ピークを中心を求めた。Fig4.5～7における実線はそのあてはめの結果を示している。スペクトルからの結果をまとめたのがTable4.1とTable4.2である。Table4.1は、三回の測定におけるRhとKrの裸イオンの1sへの放射性再結合スペクトルの差  $E_{RR}^{Rh} - E_{RR}^{Kr}$  の値と三回の測定の平均値、Table4.2は、Table4.1で得られた  $E_{RR}^{Rh} - E_{RR}^{Kr}$  の値から  $Rh^{44+}$  の1s束縛エネルギーと  $Rh^{44+}$  の1sラムシフトの値をそれぞれ、実験値と理論値、実験値と理論値の差を示している。Rhの放射性再結合線とKrの放射性再結合線とのエネルギー差は、Table4.1における実験値～までの値となった。系統的誤差をチェックする目的から、計三回の実験を行ったが、それらの間に系統的なばらつきなどは見られないため、それらの加重平均をとり、最終的に実験値としてTable4.1における実験値の平均に示されている値  $10372.3 \pm 2.3 \text{ eV}$  を得た。この  $E_{RR}^{Rh} - E_{RR}^{Kr}$  の最終値と  $Kr^{35+}$  の1s束縛エネルギーの既知の値<sup>[1]</sup>を用いて(4.6)式に代入を行い、 $Rh^{44+}$  の1s束縛エネルギーを求めるとTable4.2における実験値の  $Rh^{44+}$  1s束縛エネルギーに示される値  $23308.6 \pm 2.3 \text{ eV}$  が得られる。更に、点電荷のディラックの固有値を差っ引くことにより、水素様Rhイオンの1sラムシフトの値としては、Table4.2における  $Rh^{44+}$  ラムシフトにおける値  $28.5 \pm 2.3 \text{ eV}$  を得ることができた。この誤差は統計によるもののみを示している。

Table1 三回の測定における  $E_{RR}^{Rh} - E_{RR}^{Kr}$  の値

ERh <sub>RR</sub> -EKr <sub>RR</sub>					
実験	電子ビームエネルギー	電子ビーム電流(mA)	実験値 ( e V )	理論値 ( e V )	実験-理論 ( e V )
	75 k e V	1 3 5	10376.4 ± 3.0		
	107 k e V	1 3 6	10377.4 ± 5.6		
	75 k e V	1 5 5	10369.3 ± 3.0		
平均			10372.3 ± 2.3	10375.76	-3.4 ± 2.3

Table2 水素様Rhイオンの1s束縛エネルギーと1sラムシフトの値

	実験値 ( e V )	理論値 ( e V )	実験-理論 ( e V )
Rh <sup>44+</sup> 1s binding energy	23308.6 ± 2.3	28311.98	-3.4 ± 2.3
Rh <sup>44+</sup> 1s Lamb shift	28.5 ± 2.3	25.13	3.4 ± 2.3

## 6. 考察

今回の実験では、まだ問題点も残されている。ピークの幅は半導体検出器で決まっており約500eVであるが、数時間から数十時間というため込みの結果、統計を稼ぐことにより、ピーク中心を半値幅の1%の精度で決定することができた。しかしながら、統計以外に誤差を生む要因がないかどうか慎重に考察する必要がある。例えば、電子ビームエネルギー75keVのスペクトルにあるW(n=2)への放射性再結合線など、重なっている小さなピークの寄与がどの程度あるか考慮する必要がある。また、Rh導入用のMEVVAイオン源のショットごとのイオン導入量の変動による電子ビームエネルギーの変動も誤差に影響することが考えられる。今回、このような研究を進展させ、さらに精度を上げた測定を目指して、新たな高エネルギーX線用高分解能結晶分光器の立ち上げも行った。ヨハンソン型の結晶分光器であり、EBITからの弱いX線を集光するような配置となっている。今後、さらなる分解能と明るさの向上のため結晶に改良を行っている。また、系統的な実験を可能とするため、低融点金属をEBITに導入するためのK-cellイオン源<sup>[4]</sup>の立ち上げもおこなった。これらの事は、本論文にて詳しく述べる。

[1]Beyer H.F.et al.,"X-ray radiation of highly charged ions",Springer series on atoms and plasmas,p.82

[2]中村信行、大谷俊介、日本物理学会誌52(1997)919

[3]西沢一生 多価イオンの分光を目的とした電子ビーム型イオン源の開発 電気通信大学修士論文(1995年度)

[4]伊藤智 電子ビームイオントラップへの導入用イオン源の開発 電気通信大学修士論文(1999年度)