

# 電子ビームイオントラップによる Sn 様・In 様イオンの 可視領域発光線の観測

中村信行研究室 PIPATPAKORN PATIVATE

## 1 序論

### 1.1 微細構造定数の変動検知

微細構造定数 $\alpha$ とは電子と電磁場の相互作用の大きさを表す無次元の定数であるが、クエーサーからの吸収スペクトルの研究により、 $\alpha$ 定数が変動する可能性があるとの議論がある[1]。その議論を確かめるためには $\alpha$ に対して感度の異なる原子時計の比較が一つの方法であり、感度 $\delta\alpha/\alpha \sim 10^{-19}$ /年以上が達成されれば地球上で検証できるが、現在のストロンチウム光格子時計では $10^{-18}$ /年である[2]。理論研究では多価イオンの可視領域の遷移を利用した新たな高精度原子時計が提案され、これまでの精度を上回ることが期待されている[3]。

また、多価イオンの中で 1)  $\alpha$ 変動に感度が高い、2) 安定な同位体が存在する、3) 170-3000nm における基底状態への遷移周波数を持つ長寿命の準安定状態が存在するという原子時計応用に適した条件を満たすものとして、Ag 様、Cd 様、Sn 様、In 様が注目されており、それらの可視域の発光線の観測・同定が望まれている[4]。

### 1.2 核融合実験炉のプラズマ診断

多価イオンの知見はプラズマ診断に有用であり、将来の新エネルギー源に繋がる核融合の研究においても必要とされている。近年、国際共同研究により国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor : ITER) の建設が進められており、2025 年に運転開始を目指している。

ITER のプラズマ容器の下にはダイバータという部分があり、プラズマからの高い熱流や粒子の流れを受け止める役割を果たす。その部分は熱負荷に非常に強い W が材料として使用される。W はスパッタリングにより炉内に混入すると、高温によって電離することで、多価イオンとなる。しかし、W 多価イオンは核融合炉内の中心でも完全に電離しないため、放射冷却により炉内のプラズマ温度を低下させる。この現象によって核融合の効率を低下させることが問題となる。そのため、W 発光線の分光計測で炉内の W の密度や価数分布などを診断することが重要であり、W 多価イオンの分光データが必要となる。特に可視領域では他の領域よりミラーやレンズなど様々な素子が豊富であるため、測定系を構築することが容易である。そのため、可視領域の発光データが非常に重要となる。

### 1.3 目的

本研究では微細構造定数 $\alpha$ 変動の検知に向けた次世代原子時計の開発やITERのプラズマ診断に有用である多価イオンの可視域発光線の観測と同定を、先行研究[5]より $4f$ 電子数が多く複雑なIn様( $4f^3$ )及びSn様( $4f^4$ )イオンについて行うことが目的である。

W( $Z=74$ )、Re( $Z=75$ )、Os( $Z=76$ )の3元素について等電子系列における原子番号依存性を系統的に調べ、理論計算と比較することで、遷移を同定し、その波長を実験的に決定する。

## 2 実験

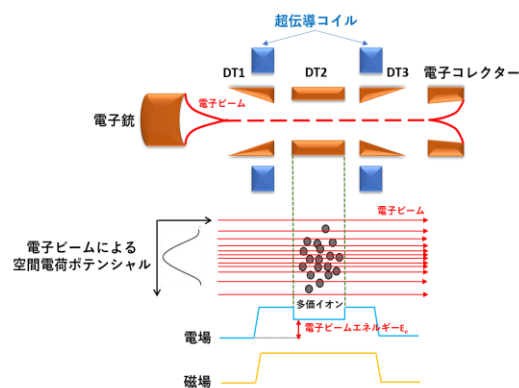


図1 EBITの概略図

本研究では電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap: EBIT)を用いて多価イオンを生成した。EBITは図1に示すように、主に電子銃、3つの円筒電極からなるドリフトチューブ (Drift Tube: DT)、ヘルムホルツ型超伝導コイル、電子コレクターから構成されている。電子銃から放出され、DTによって加速された電子は超伝導コイルの磁場で圧縮される。トラップ領域にトラップさ

れたイオンに電子ビームを照射し、電子を1つずつ剥ぎ取る逐次電離を利用して高価数のイオンを生成する。トラップ領域を通過した電子ビームは最後に電子コレクターで回収される。イオントラップは、DT1とDT3にDT2より高い電圧を加えることで生成した軸方向の井戸型ポテンシャルと、電子ビームによる径方向の空間電荷ポテンシャルによって行う。EBITは電子ビームエネルギーを変更することで、生成できるイオンの価数の上限

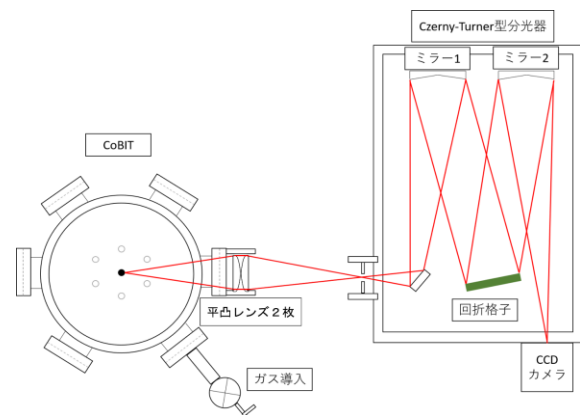


図2 CoBITと可視分光器

を決定することができる。

本研究では小型電子ビームイオントラップ (CoBIT)を用いて実験を行った。図2に示したようにガスを導入して中央部分で多価イオンが生成されて発光する。Czerny-Turner型分光器で分光され、CCDカメラによって記録される。本実験で使用した回折格子は300本/mmと1200本/mmの2種類である。300本/mmの回折格子による低分散測定で広範囲観測を行った後、1200本/mmの回折格子を用いて高分散測定を行い、波長決定を行った。暗電流を下げるためにCCDカメラを $-70^{\circ}\text{C}$ に冷却し、露光時間は30分に設定した。

### 3 結果と考察

#### 3.1 エネルギー依存性による価数同定

表1 Osのイオン化エネルギーと電子ビームエネルギーの設定値

Osイオンの価数	計算値(eV)[7]	設定したエネルギー(eV)
28+(Cd様)	920	960
27+(In様)	870	910
26+(Sn様)	820	860
25+(Sb様)	770	810

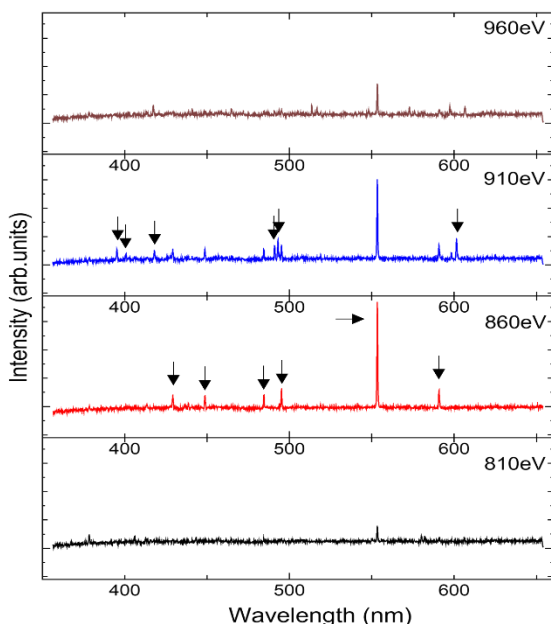


図3 低分散測定によるOs発光線の観測結果

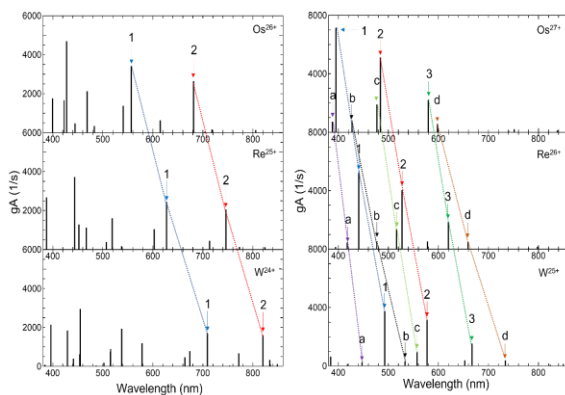
それぞれの元素について電子エネルギー依存性を調べることにより、Sn様・In様イオンからの発光であることを確認した。例えば図3に示したグラフは低分散測定のOs発光線のエネルギー依存性であり、表1に示したイオンの生成エネルギーを参考し、価数の同定を行った。図中の矢印で示したように810eVで観測されず860eVで観測された発光線をSn様、860eVで観測されず910eVで観測された発光線をIn様と同定した。高分散測定も同様にエネルギー依存性を観測すること

で、狭い領域で多数の発光線がある際の価数同定を行った。

#### 3.2 遷移波長と遷移確率の計算

本研究では波長決定と遷移同定をするために、観測実験を行うと共に Flexible Atomic Code (FAC) と呼ばれる原子計算コードを用いて遷移波長と遷移確率の計算を行った。

今回の計算では基底状態の電子配置の他、1つあるいは2つの4f電子が5sに励起した状態を考慮した。例えばIn様は $4f^3$ 、 $4f^25s^1$ 、 $4f^15s^2$ の3つの電子配置、Sn様は $4f^4$ 、 $4f^35s^1$ 、 $4f^25s^2$ の3つの電子配置を考慮し、微細構造準位やそれらの準位間の遷移を計算した。その結果を図4に示す。図の縦軸は統計重率( $g$ )と遷移確率( $A$ )の積である。発光線の強度に比例するものは本来上準位の占有密度と遷移確率の積のため、 $gA$ 値を実験結果の強度と直接比較することはできないが、狭いエネルギー範囲において占有密度を統計重率で置き換えることは良い付近となるため、遷



Sn様イオンの発光線 In様イオンの発光線

図4 FAC計算によるSn様、In様の発光線

移同定に有用である。これを観測実験と比較することで遷移同定を行った。

### 3.3 In 様イオン( $4f^3$ )

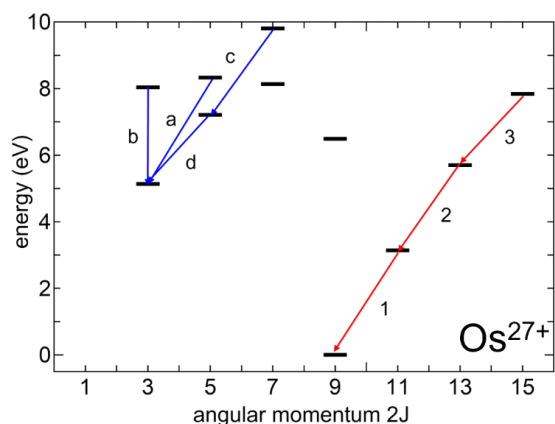


図5 In 様  $Os^{27+}$  の基底配置 ( $4f^3$ ) 微細構造準位図

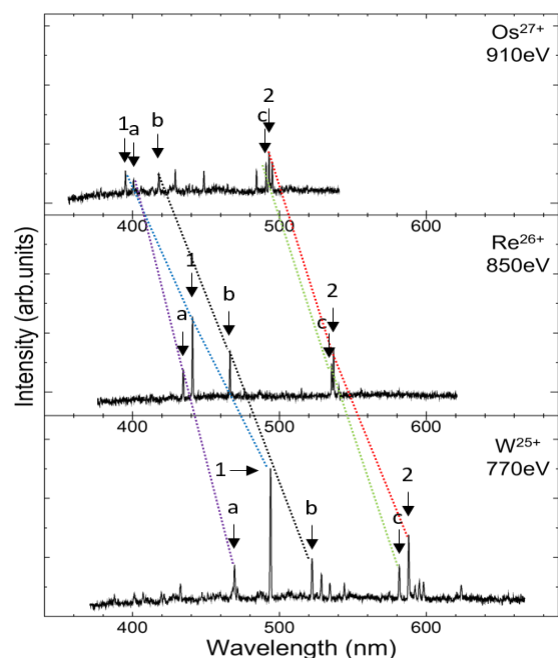


図6 低分散測定による In 様 Os、Re、W 発光線の観測 1

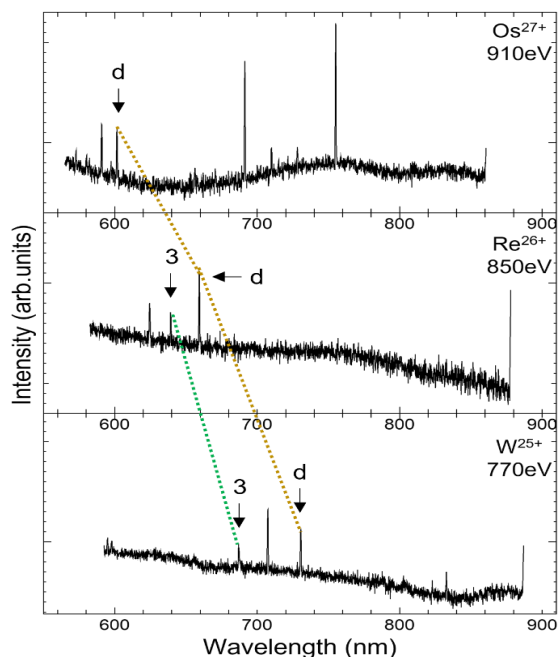


図7 低分散測定による In 様 Os、Re、W 発光線の観測 2

FAC 計算によると、Os の場合、In 様の  $4f^3$  微細構造準位は約 33eV のエネルギー幅に 40 の準位が存在する複雑な構造を持つ。しかし、CoBIT で観測される比較的強度強い発光線は微細構造準位の中でも最も低い準位間の遷移という傾向がある。図5は例として  $Os^{27+}$  について基底配置から 10eV までの範囲にある微細構造準位を示したものである。

低分散測定の観測結果から 380-680nm および 560-880nm における In 様 Os、Re、W スペクトルをそれぞれ図6、図7に示し、図5における 1、2、3、a、b、c、d の各遷移を矢印で示した。

図6で示した 910eV における短波長側 3本の発光線は電子のエネルギー依存性から In 様 Os のものと確認できるが、図4の FAC 計算の通りだとすると短波長側から a、1、b の遷

移となる。しかし、もしその通りだとすると、これらのライン間の強度比が Re や W と異なり、1 が a や b よりも弱いことになる。最も低い準位間の遷移である 1 が励起状態間遷移である a、b よりも弱くなることは考えがたいため、Re と W の発光線の強度比と同様に図 6 に付けたように Os の発光線では短波長から 1、a、b と同定した。

より長波長側の 560nm-880nm における In 様イオンのスペクトルを図 7 に示す。この波長領域では Re と W における 3、d に相当する遷移が観測されたが、Os では 3 の遷移が観測できなかった。

### 3.4 Sn 様イオン( $4f^4$ )

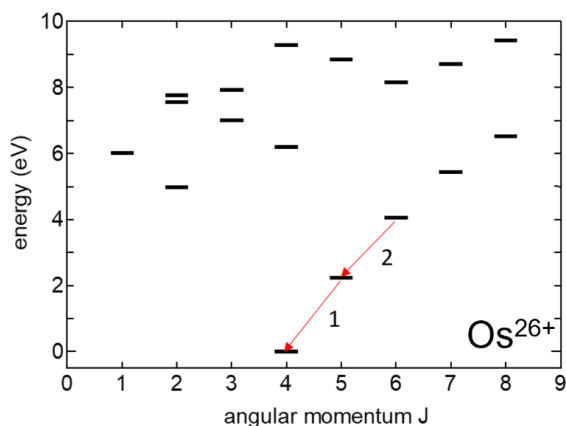


図 8 Sn 様  $Os^{26+}$  の基底配置 ( $4f^4$ ) 微細構造準位図

$4f$  電子を 4 つ持つ Sn 様多価イオンについても同様に実験結果を FAC 計算と比較し、波長決定と遷移同定を行った。Os のエネルギー準位の計算によると、Sn 様の  $4f^4$  配置では約 53eV の範囲に 106 の微細構造準位が存在し、In 様よりさらに複雑な原子構造となる。

$Os^{26+}$  について 10eV までの微細構造準位を図 8 に示す。In 様と同様に本研究において得られた比較的強度の強い発光線に注目し、基底状態付近の遷移同定を試みた。

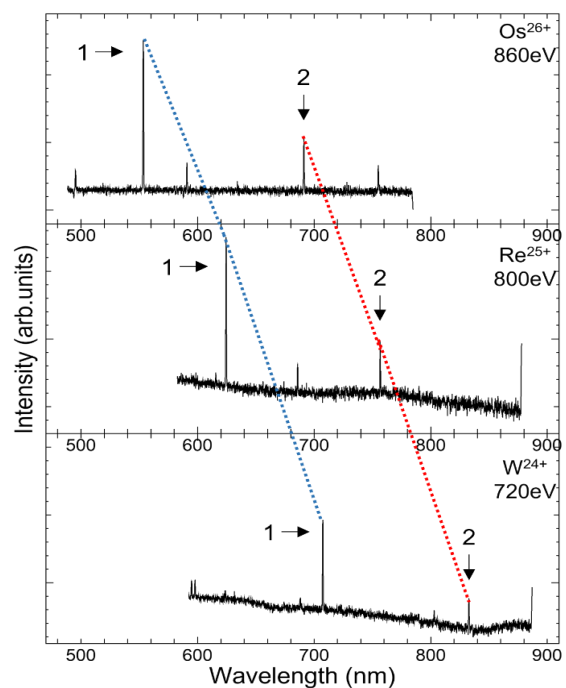


図 9 低分散測定による Sn 様 Os、Re、W 発光線の観測

図 9 は低分散測定による Os、Re、W イオンの観測結果で、矢印で示した発光線はエネルギー依存から Sn 様と同定されたものである。ここで、それぞれ 2 本の発光線が比較的強く観測され、原子番号の増加に伴い波長が短波長側に変化していることが分かった。比較的強い強度を持つと予想される最も低い準位間の遷移 1 と 2 の波長を計算すると、実験結果と同様に原子番号とともに図 4 のように変化することが示された。その波長の値および原子番号依存性から実験で観測された 2 本

のラインは図9に矢印で示したように図8中の遷移1、2に相当すると考えられる。

#### 4 結論と今後の展望

本研究では小型電子ビームイオントラップを用いて4f電子数が多く複雑なIn様(4f<sup>3</sup>)及びSn様(4f<sup>4</sup>)多価イオンにおける可視領域の発光線を観測した。低分散測定で等電子系列における原子番号依存性を系統的に確認して、計算と比較することで、微細構造の中で低いエネルギーを持つ準位間の遷移を同定した。また、高分散測定でそれらについて波長を決定した。結果としてIn様イオンでは7本(Osのみ6本)、Sn様イオンでは2本の発光線を新たに波長決定・遷移同定することができた。

いずれも最も低い準位付近の遷移は比較的強度が強くて同定しやすい傾向があった。それ以外の比較的強度の弱い発光線の同定や、4f電子を5つあるいは6つ持つより複雑なイオンの観測および同定が今後の展望となる。

#### 参考文献

- [1] Webb, J. K., et al. "Indications of a spatial variation of the fine structure constant." *Physical Review Letters* 107.19 (2011): 191101.
- [2] Bloom, B. J., et al. "An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10<sup>-18</sup> level." *Nature* 506.7486 (2014): 71-75.

[3] Berengut, J. C., et al. "Highly charged ions with E 1, M 1, and E 2 transitions within laser range." *Physical Review A* 86.2 (2012): 022517.

[4] Safronova, M. S., et al. "Highly charged ions for atomic clocks, quantum information, and search for  $\alpha$  variation." *Physical review letters* 113.3 (2014): 030801.

[5] Murata, Shunichi, et al. "Visible transitions in Ag-like and Cd-like lanthanide ions." *Physical Review A* 96.6 (2017): 062506.