

# 4f開殻重元素イオンの微細構造準位の研究

電気通信大学 レーザー新世代研究センター

中村信行研究室 中島貴之

## 1 序論

### 1.1 研究背景

中性原子から2つ以上の電子を取り除いたイオンを多価イオンと呼ぶ。多価イオンは、地球上ではほとんど自然に存在していない。一方で太陽コロナなどの天体プラズマや、現在建設されている国際熱核融合実験炉 ITER 内の核融合プラズマのような高温プラズマ中では多価イオンが支配的な存在になる。たとえば太陽コロナの中では、鉄やマグネシウムといった元素が多価イオンとして存在している。多価イオンの発光はプラズマの温度や電子密度に対して強い依存性を示すため、その発光線はプラズマ診断を行ううえで非常に有用である。現在建設されている国際熱核融合実験炉に関連した研究では、実験炉内のプラズマ診断に向けたタングステンの可視領域発光線の分光研究が盛んに行われている[1,2]。しかし、タングステンにおいて4f軌道が開殻となる  $W^{20+}$  から  $W^{27+}$  までの発光線の観測データが不足しているのが現状であり[3]、4f開殻重元素イオンの構造理解はプラズマ診断に向けて重要な課題となる。さらに近年では、多価イオンを原子時計に応用することで[4-6]、基礎物理定数の変化[7]を探求する試みが理論研究より提案されている。そういった定数の中でも微細構造定数( $\alpha = e^2 / \hbar c$ )が時間や空間で変化する可能性が理論研究より示唆されている[8]。2008年に行われた実験では  $10^{-17}$ /年程度の範囲で変化しないことが実証されたが[9]、より高い精度で変化を探るために、近年多価イオンが注目されている。その候補としていくつかの多価イオンが挙げられているが、Dzuba らの理論研究[10]では  $4f^6 5s$  を基底状態を持つ  $Ho^{14+}$  における可視領域の遷移を利用することが提案され、イオン冷却および  $\alpha$  変動検知に利用する可視領域の遷移の波長が理論的に求められている。しかし、無数の微細構造準位を持つ複雑な多電子イオンにおけるエネルギー準位を正確に計算することは困難であり、遷移波長の計算には大きな誤差が含まれる。従って、 $\alpha$  変動検知実験を具体的にデザインするためには、実験による遷移の同定と波長の決定が必要不可欠となる。

このようにプラズマ診断という観点だけでなく、理学

的観点からも4f開殻重元素多価イオンの発光線を観測、研究することは非常に大きな意味を持つ。そのため本研究では、4f開殻重元素多価イオンの原子構造の理解に重点をおいて議論していく。

### 1.2 研究目的

本研究は、 $\alpha$ 変動検知の他、プラズマ診断などで求められている多電子多価イオンの構造を分光測定により理解すること、特に4f軌道が開殻となり複雑な微細構造を持つエネルギー準位を、原子番号依存、価数依存などを通して系統的に理解することを目的としている。そのために、比較的電子配置が単純な3つの等電子系列（銀様： $4d^{10}4f$ 、カドミウム様： $4d^{10}4f^2$ 、インジウム様： $4d^{10}4f^3$ ）について、Ho、Er、Tmの3元素を用いて調べ、理論計算との比較および遷移同定を行った。また、 $\alpha$ 変動検知に注目されているホルミウム14価についても分光測定を行い、理論計算[10]の検証および遷移同定に向けた実験的基礎を構築することを目指した。

## 2 実験

本実験では、多価イオンの生成に電子ビームイオントラップ (Electron beam ion trap: EBIT) を使用し、可視領域の分光測定と極端紫外領域 (以下 EUV) の分光測定を行った(図1)。EUV領域の分光測定は、主に銀様、カドミウム様、インジウム様の3つの等電子系列における発光線の価数同定を補佐する目的で行われた。

可視分光器には Jobin Yvon 製の Czerny-Turner 型分光器 HR320 を用い、回折格子には溝本数が 300 本/mm と 1200 本/mm のものを分解能に応じて使い分けた。トラップ領域の多価イオンからの発光は CoBIT に放射状に取り付けられている窓から観測することができる(図1)。窓には凸面レンズが取り付けられており、多価イオンの発光が可視分光器の入射スリットに集光される。分光器内の回折格子によって分散された光は結像凹面鏡によって CCD に集光されて検出された。検出器には Andor 社製の iDus 416 Series CCD カメラと Princeton Instruments 社製の Spec-10: 400B CCD カメラの2つ

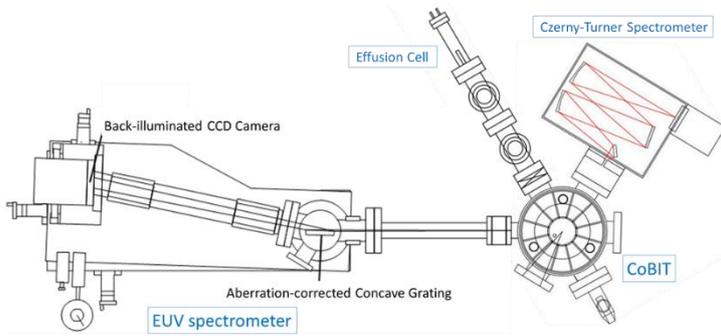


図1 小型EBITと可視分光器、EUV分光器、試料導入部の配置。本研究で使用した装置の配置を示しているため、ガス導入管は図示されていない。

を相補的に使用した。実験の際は、iDus 416は電子冷却によって $-70^{\circ}\text{C}$ 、Spec-10:400Bは液体窒素冷却によって $-120^{\circ}\text{C}$ まで冷却して使用した。

EUV分光器には平面結像型斜入射分光器を用いた。回折格子には溝本数が1200本/mmの日立ハイテック社製の平面結像型不等間隔凹面回折格子、検出器にPrinceton Instruments社製のCCDカメラ(PIXIS-XO:400B)をそれぞれ用いた。測定時はCCDカメラを電子冷却によって $-70^{\circ}\text{C}$ まで冷却した。EUV領域の観測結果はすべて、可視領域の分光測定との同時測定によって得られたものであり、露光時間は30分とした。

本研究で対象とした、Ho、Er、Tmを導入する際にはいずれも蒸着セルを使って導入し、ホルミウムとエルビウムの場合は $950^{\circ}\text{C}$ 、ツリウムの場合は $700^{\circ}\text{C}$ に温度設定した。

### 3 結果および考察

#### 3.1 発光線の帰属イオン同定

Ho、Er、Tmの3つの等電子系列における発光線の帰属イオン同定に当たって、可視、EUV領域の分光測定を同時に行った。EUV領域の発光線においてはFlexible atomic code(以下、FACと表記する)との比較を行った。ここではHo多価イオンの結果(図3.1)を例にして発光線の帰属イオン同定について詳しく述べていく。

図2(下図)がEUV領域、特に4~9nm付近における分光測定結果、図2(上図)がFAC計算で得た発光線の理論値、図3が可視領域分光測定による結果の例を示している。図2(上図)では基底状態の占有率が支配的であるとして基底状態を終状態とする各E1遷移のみを表示してある。図示された遷移が計算で得られた全てということではない。縦軸は各E1遷移の $gA$ 値を示している。図2(上図)から、 $4d^9 4f^{k+1} - 4d^{10} 4f^k$ 配置間(銀様: $k=1$ ,カドミウム様: $k=2$ ,インジウム様: $k=3$ )の $4f - 4d$ 遷移が全体として価数依存を示すことなく6nm付近に現れることがわかる。その反面、 $4d^{10} 4f^{k-1} 5g - 4d^{10} 4f^k$ 配置間の $5g - 4f$ 遷移、 $4d^{10} 4f^{k-1} 5d - 4d^{10} 4f^k$ 配置間の $5d - 4f$ 遷移がそれぞれ価数依存を示しており、価数が下がるにつれて長波長側へ移行する価数依存性を持つことがわかる。そして図2(下図)の結果を見ると、6~6.5nm付近で観

測された発光線は電子ビームエネルギー依存性を示すことなくそこに存在している一方で、両側の矢印で示されている発光線は電子ビームエネルギー依存性を示していることがわかる。図2(上,下図)の間には非常によい一致がみられたため、FACの結果をもとに観測されたそれぞれの発光線を短波長側から(i)  $4d^{10} 4f^{n-1} 5g$ 配置と $4d^{10} 4f^n$ 配置間の $5g - 4f$ 遷移、(ii)  $4d^9 4f^{n+1}$ 配置と $4d^{10} 4f^n$ 配置間の $4f - 4d$ 遷移、(iii)  $4d^{10} 4f^{n-1} 5d$ 配置と $4d^{10} 4f^n$ 配置間の $5d - 4f$ 遷移とそれぞれ同定することができた。ただし(i)  $5g - 4f$ 遷移について、予測された $gA$ 値は(ii)  $4d - 4f$ 遷移に匹敵するほどであるのに対して、測定結果の相対強度は非常に小さいものとなっている。この点については定性的な考察として、1つしかない $4f$ 電子が励起する可能性よりも10個ある $4d$ 電子の方が遷移に関与する可能性が高いというものが考えられる。この考察はどちらから軌道の電子が多いか少ないという単純な数の議論でしかないが、今回の測定は電子ビームエネルギー依存性を

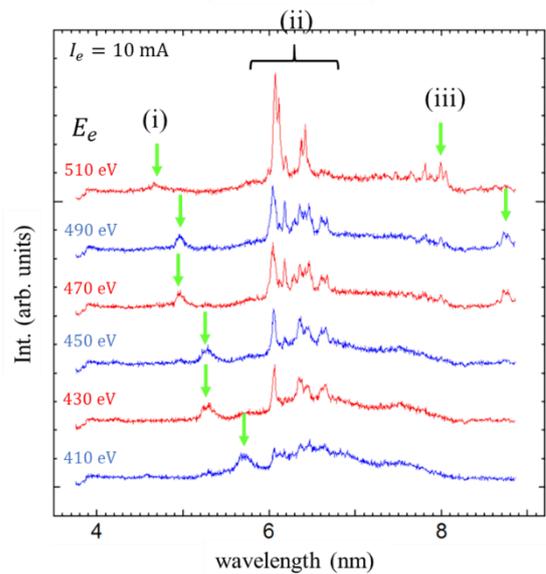
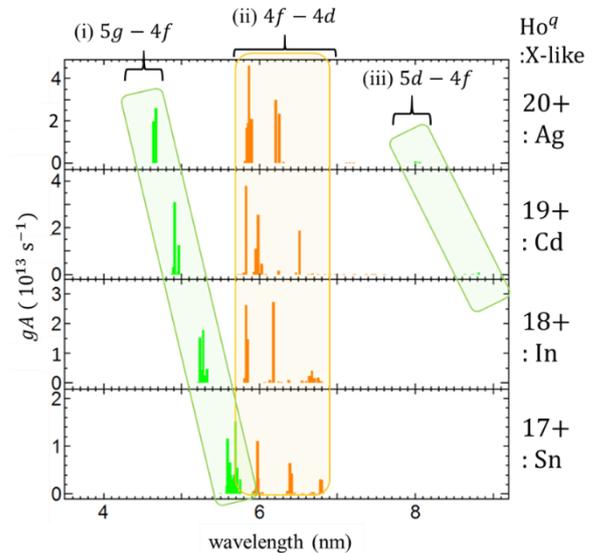


図2 Ho多価イオンの分光測定結果と帰属イオン同定。上図:FAC計算によって求めたHo多価イオンのE1遷移。下図:Ho多価イオンのEUV領域の分光測定結果。 $E_e$ は電子ビームエネルギー、 $I_e$ は電流を示す。

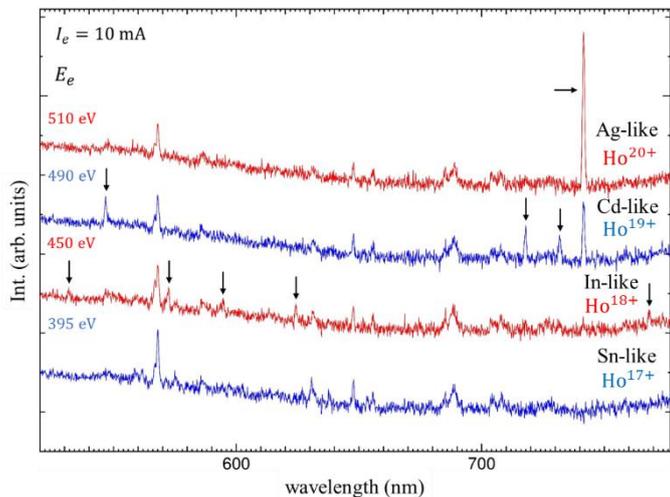


図3 Ho多価イオンの可視領域の分光測定結果。矢印が付いた発光線が帰属イオン同定された発光線である。 $E_e$ は電子ビームエネルギー、 $I_e$ は電流を示す。

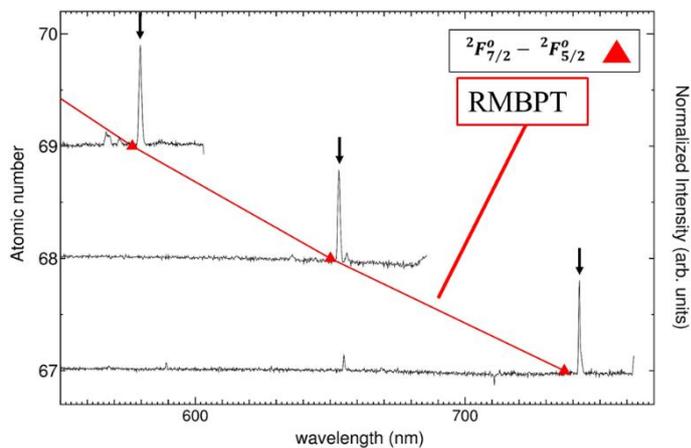


図4 銀様等電子系列発光線の原子番号依存性。矢印で示された発光線が微細構造間M1遷移( ${}^2F_{7/2}^0 - {}^2F_{5/2}^0$ )に相当する。赤色の三角形はRMBPTの計算結果。

調べることに重点を置いていたため、この差異については特に重要視しなかった。

EUV領域の遷移同定が済んだことで、価数と電子ビームエネルギー $E_e$ の関係が明らかになった。図2内の比較、特に遷移(i)、(ii)の動向により、 $E_e = 510$  eVで銀様 $\text{Ho}^{20+}$ が生成され、 $E_e = 490, 470$  eVでカドミウム様 $\text{Ho}^{19+}$ 、 $E_e = 450, 430$  eVでインジウム様 $\text{Ho}^{18+}$ 、 $E_e = 410$  eVで錫様 $\text{Ho}^{17+}$ がそれぞれ生成されていることが分かった。これらを踏まえて、可視領域の分光測定結果(c)において $E_e = 510$  eVの発光線を銀様 $\text{Ho}^{20+}$ 、 $E_e = 490$  eVの発光線をカドミウム様 $\text{Ho}^{19+}$ 、 $E_e = 450$  eVの発光線をインジウム様 $\text{Ho}^{18+}$ のものとそれぞれ帰属イオン同定することができた。それらが矢印で示されている。同様の取り組みから、Er、Tm多価イオンについても、これまで観測報告の無かった多くの可視領域発光線の帰属イオン同定に成功した。

### 3.1.1 銀様多価イオン

図4が銀様多価イオン $\text{Ho}^{20+}$  ( $Z = 67$ )、 $\text{Er}^{21+}$  ( $Z = 68$ )、 $\text{Tm}^{22+}$  ( $Z = 69$ )の測定結果である。測定時間は30分、回折格子には300本/mmのものを使用した。なお、測定結果について強度校正を行っていないため発光線の絶対強度を議論できない。また、元素ごとにおいてもそれぞれ別の測定であるため、それらを跨いだ強度比較を行うことはできない。電子ビームエネルギー依存性とU.Safronovaによって行われた相対論的多体摂動論(The relativistic many-body perturbation theory:RMBPT)計算[11]との比較により、矢印で示された発光線が銀様等電子系列における微細構造間M1遷移( ${}^2F_{7/2}^0 - {}^2F_{5/2}^0$ )と同定され、その原子番号依存性が図4からよくわかる。表1に ${}^2F_{7/2}^0 - {}^2F_{5/2}^0$ 発光線の中心波長と理論計算との比較を示す。中心波長は1200本/mmの回折格子を用いた測定結果から求めた。各理論計算とも実測値と少なくとも5nm程度の差異がみられるが、全体を通して良い一致を示している。中でもRMBPT計算の

結果が実測値を最もよく説明していることがわかる。eV単位でその差を見てみると、Ho,Erの場合はRMBPTと実測値で0.01eVの差、Tmの場合も0.0098eVの差となっており、実測値とよく一致している。また、半経験的に求められたZ-scaling値とも実測値は良い一致を示していることがわかる。

今後としては、 $\text{Yb}^{23+}$  ( $Z = 70$ )や $\text{Lu}^{24+}$  ( $Z = 71$ )といった高い原子番号の元素まで観測対象を広げていき、より系統的な観点から理論計算と実測値の差を議論していく必要があると考えられる。

表1 銀様多価イオンの微細構造間M1遷移( ${}^2F_{7/2}^0 - {}^2F_{5/2}^0$ )の波長。 $Z = 67 \sim 69$ における ${}^2F_{7/2}^0 - {}^2F_{5/2}^0$ 遷移の実測値と理論計算の並べて表示されている。なお、本測定結果に含まれる誤差は0.02 nmと見積もった。

Z	元素	実測値 (nm)	理論計算			
			FAC (nm)	RMBPT (nm) [11]	Z-scaling <sup>a</sup> (nm) [12]	他の研究の実測値 (nm)
67	Ho	741.20	732.76	736.76	746.73	740.74 <sup>b</sup>
68	Er	653.50	646.74	650.07	656.21	
69	Tm	579.31	573.82	576.67	579.00	

<sup>a</sup> 参考文献[11]内で行われた、Zを変数とした関数によって求められた半経験的な予測値。

<sup>b</sup> 参考文献[12]の参考文献より。

### 3.1.2 カドミウム様多価イオン

図5がカドミウム様多価イオン $\text{Ho}^{19+}$  ( $Z = 67$ )、 $\text{Er}^{20+}$  ( $Z = 68$ )、 $\text{Tm}^{21+}$  ( $Z = 69$ )の測定結果である。銀様等電子系列の場合と同様、測定時間は30分、回折格子には300本/mmのものを使用した。電子ビームエネルギー依存性とRMBPT[11]との比較により、矢印で示された5本の発光線がカドミウム様等電子系列における微細構造間M1遷移と同定され、原子番号の増加に伴って同一の遷移がより短い波長をもつようになる原子番号依存性が見てとれる。

図6は、元素ごとの発光線の相対強度と理論計算によ

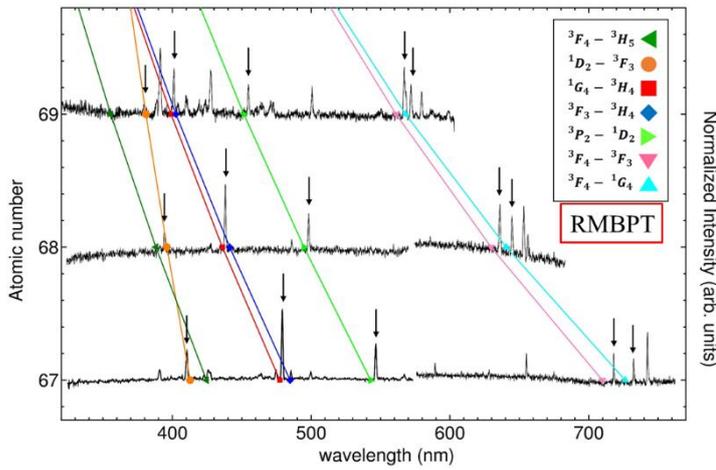


図5 カドミウム様等電子系列におけるM1遷移の原子番号依存性。遷移同定された発光線が矢印で示されている。それぞれの記号がRMBPTによる遷移とその波長を表しており、元素ごと直線で結ばれている。なお測定結果ごと強度校正を行っている。

って得られた $gA$ 値の比較を表した図である。比較に使われた理論計算は、 $\text{Ho}^{19+}$ 、 $\text{Er}^{20+}$ の場合はRMBPTとCI計算[13]、FAC計算の3つ、 $\text{Tm}^{21+}$ の場合はRMBPT計算とFAC計算の2つである。CI計算は、配置間相互作用のすべての次数の項を含んで電子の波動関数を導出する計算方法で、RMBPT同様、U.Safronovaによって計算が行われた。ただし、 $\text{Tm}^{21+}$ に関しては計算結果が無いため比較を行わなかった。

$\text{Ho}^{19+}$ 、 $\text{Er}^{20+}$ についてのRMBPTとCI計算を比べると、遷移波長の予測値に多少の差異がみられるものの全体を通してよい一致を示していることがわかる。一方でFAC計算は上段2つの計算結果に対して、遷移波長の予測値の相対関係が逆転している遷移が出ている。この点は $\text{Tm}^{21+}$ についても共通して言えることである。こういった違いが生じた原因として、逆転を起こしている4本の遷移( $^1G_4 - ^3H_4$ と $^3F_3 - ^3H_4$ 、 $^3F_4 - ^3F_3$ と $^3F_4 - ^1G_4$ )すべてに関与している $^1G_4$ 準位と $^3F_3$ 準位が互いに非常に近いエネルギーを持っていることがあげられる。なぜなら、両準位がほとんど縮退しているために、どちらがよりエネルギーの高い準位(もしくは低い準位)とするかによってそれぞれの遷移波長の相対関係は逆転してしまうためである。実際にRMBPTとCI計算では $^3F_3$ 準位を $^1G_4$ 準位より高エネルギーとする反面、FAC計算では $^1G_4$ 準位がより高エネルギーとする結果が得られた。また一方で、すでに行われた他グループの $\text{W}^{26+}$ に関する研究[14]では、 $^3F_3$ 準位を $^1G_4$ 準位より高エネルギーとする計算結果のもと遷移の同定が行われている。よって今回の比較にあたっては、多数派である $^3F_3$ 準位を $^1G_4$ 準位より高エネルギーとする点と互いに良い一致を示しているという点からRMBPTとCI計算を信頼できるものとみなし、遷移同定を行った。

今回、理論計算との比較によって $^1D_2 - ^3F_3$ 遷移、 $^1G_4 - ^3H_4$ 遷移、 $^3F_3 - ^3H_4$ 遷移、 $^3P_2 - ^1D_2$ 遷移、 $^3F_4 - ^3F_3$ 遷移、 $^3F_4 - ^1G_4$ 遷移の6本の同定に成功した。

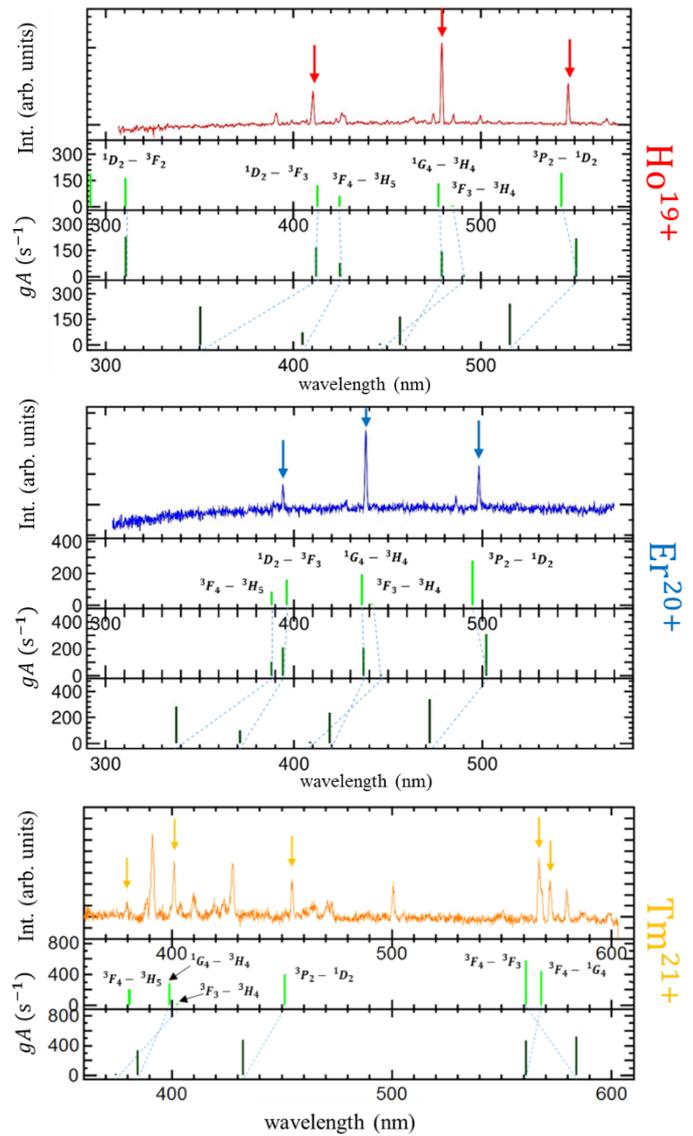


図6 カドミウム様等電子系列の発光線と各理論計算の比較。 $\text{Ho}^{19+}$ (上図)、 $\text{Er}^{20+}$ (中図)の420~770 nm付近の測定結果と各理論計算の比較。図はどちらも上から測定結果、RMBPTの結果、CIの結果、FACの結果を表している。下図： $\text{Tm}^{21+}$ の350~610 nm付近の測定結果と各理論計算の比較。上から測定結果、RMBPT計算の結果、FACの結果を表している。計算値と対応する遷移が示されており、同じ遷移が計算結果ごと点線で結ばれている。

### 3.1.3 インジウム様多価イオン

図7にインジウム様多価イオン $\text{Ho}^{18+}$  ( $Z = 67$ )、 $\text{Er}^{19+}$  ( $Z = 68$ )の測定結果と理論計算の比較を示す。測定結果は、測定時間が30分、回折格子に300本/mmを使用したときのものである。比較に用いた理論計算はFAC計算(下段)とU.Safronovaによって行われたCI計算(中段)である。今回は計算結果が無かったためRMBPT計算は比較に用いなかった。FACとCIの結果はそれぞれ濃緑棒、緑棒で示されている。これまで同様縦軸は $gA$ 値を示している。なお、 $\text{Tm}^{21+}$ に対する比較は、CI計算の結果が無いため今回は行わないこととする。

測定結果に関して、実験による再現性の確認が取れた発光線が矢印で示されている。インジウム様と帰属イオン同定された発光線を見ると、これまでの銀様、カドミウム様と比べて発光線の相対強度が小さくなっている(図3)。これにはインジウム様の微細構造準位の多さが

関係していると考えられる。カドミウム様の基底配置  $4d^{10}4f^2$  の微細構造準位の数 は 13 であったのに対して、インジウム様の基底配置  $4d^{10}4f^3$  の微細構造準位の数 は 41 まで跳ね上がる。この微細構造準位の数 の増加が選択則で許される電子の経路を増やした結果、各準位の占有率が分散されてしまっていると考えられる。そのため、各発光線の相対強度がこれまでの 2 つの等電子系列に比べて小さいと考察できる。しかし、これは各等電子系列の基底配置全体で電子の占有密度が等しくなっているという仮定を前提においた議論であるため、等電子系列間の相対強度の議論を行うのであれば各準位の占有率を定量的に求める必要があると考えられる。また、2 つの理論計算と測定結果を比較しても、予測された発光線の数と同定された発光線の数に明らかな差がみられる。観測された発光線についても、準位の占有率や遷移の分岐比なども考慮する必要がある場合、観測された発光線を単純に理論計算で  $gA$  値が大きいと予測された遷移と同定するのは危険である。つまり  $gA$  値が大きい遷移が必ずしも大きな強度を持って観測されるわけではない。そのため、インジウム様多価イオンに対しては遷移の同定まで至っていないのが現状である。占有率の議論においても、これまで基底状態付近が支配的であるとみなしてきたが、微細構造準位の数 が 41 になるとどこまでを“基底状態付近”とみなすかも重要になってくると考えられる。また、 $Tm^{20+}$  を含めた 3 元素の結果を比較しても銀様、カドミウム様の場合のように、発光線全体から原子番号依存性を示すような決定的な特徴を見出すことは現状できていない。この点は測定結果だけの話ではなく理論計算においても同じことが言える。膨大な数の計算結果の中で同じ遷移どうしの関連付けが困難な状況ではあるが、図 7 において、予測された発光線の相対位置などを元素ごと見渡しても、原子番号依存性を示すような決定的な特徴は見いだせない。また、理論計算どうしで明らかに異なる結果を示していることも遷移の同定や原子番号依存性の議論を困難にしている。

これまでにそのような不一致が生じた原因の解明に向けたためどが立っておらず、本研究の成果は発光線の帰属イオン同定にとどまった。

### 3.2 ホルミウム 14 価に関する可視領域分光測定

$Ho^{14+}$  に関しては、その背景から発光線の帰属イオン同定をより正確に行う必要があった。そこで先行研究[15]において、飛行時間測定と可視領域分光測定の同時測定により小型 EBIT で生成された多価イオンの価数分布とその時の電子ビームエネルギーの関係が調べられ、その結果、電子ビームエネルギーが 290 eV の時に  $Ho^{14+}$  が支配的に生成されるという結果が得られた。このことは電子ビームエネルギーが 290 eV の時に優勢となる発光線が  $Ho^{14+}$  に由来すると断定できることを意味しており、非常に重要な実験的事実である。同様の議論が 13 価、15

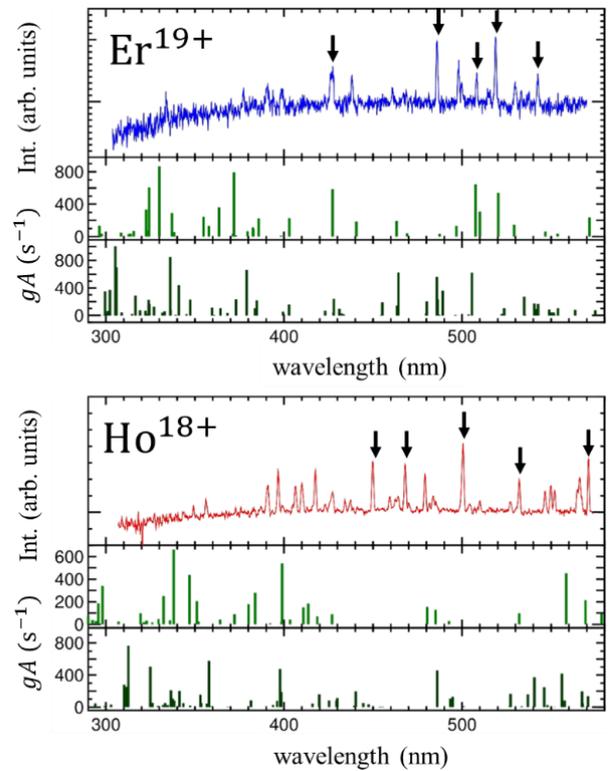


図 7 インジウム様多価イオン  $Ho^{18+}$  ( $Z = 67$ ),  $Er^{19+}$  ( $Z = 68$ ) の測定結果と理論計算の比較の例。上段が  $Er^{19+}$ 、下段が  $Ho^{18+}$  についての比較である。各図上から、測定結果、CI 計算結果、FAC 計算結果を表している。黒矢印で示された発光線がそれぞれの多価イオンによるものを表している。

価についても行われ、それぞれ発光線の帰属イオン同定に最適な電子ビームエネルギーの値が決められた。そこで本研究は先行研究の結果をもとに 13~15 価が優勢となる各電子ビームエネルギーにおいて、可視領域ほぼ全般にわたって分光測定を行った。観測波長領域はおおよそ 250 nm から 650 nm 付近である。その測定結果の一例を図 8 に示す。矢印で示された発光線が帰属イオン同定されたものであり、今回多数の発光線の帰属イオン同定に成功した。

次に図 9 に  $Ho^{14+}$  における測定結果と理論計算の比較一例を示す。比較には理論計算は M. Safronova によって行われた計算結果を使用した[16]。なお、今回は 4 つの種類の遷移のみに着目して理論計算結果から抽出し比較を行った。その 4 つの種類の遷移とは、 $4f^65s \ ^8F_J$  ( $J = 1/2, \dots, 13/2$ ) 準位を終状態とする E1、M1 遷移、 $4f^65s \ ^6F_J$  ( $J = 1/2, \dots, 11/2$ ) 準位を終状態とする E1、M1 遷移、 $4f^55s^2 \ ^6H_J^o$  ( $J = 5/2, \dots, 15/2$ ) 準位を終状態とする E1、M1 遷移、 $4f^55s^2 \ ^6F_J^o$  ( $J = 1/2, \dots, 11/2$ ) 準位を終状態とする E1、M1 遷移である。4 つの準位はどれも基底状態とその付近に存在する準位である。図 9 は上段が測定結果、中段が E1 遷移、下段が M1 遷移をそれぞれ表している。なお 4 種類の遷移はそれぞれ、 $4f^65s \ ^8F_J$  準位を終状態とする E1、M1 遷移が赤棒、 $4f^65s \ ^6F_J$  準位を終状態とする E1、M1 遷移が青棒、 $4f^55s^2 \ ^6H_J^o$  準位を終状態とする E1、M1 遷移が橙棒、 $4f^55s^2 \ ^6F_J^o$  準位を終状態とする E1、M1 遷移が黄緑

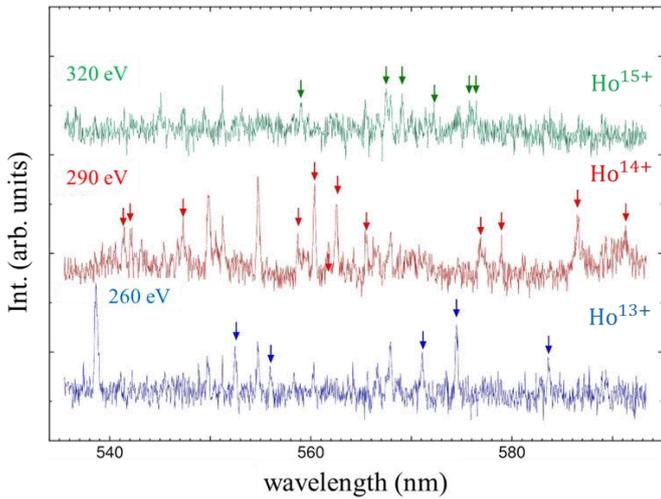


図 8 波長域 540 nm 付近から 595 nm 付近におけるホルミウム多価イオン  $\text{Ho}^{13+}$ ,  $\text{Ho}^{14+}$ ,  $\text{Ho}^{15+}$  の分光測定結果。

棒で区別されている。しかし図 9 からわかるように、理論計算と測定結果の間で明らかな不一致が見られたため、遷移同定まで至っていないのが現状である。今後は不一致の原因究明や遷移同定、本格的な理論計算の検証などに向けて、理論計算における準位選別の見直しや理論研究者との協議を進めていく必要があると考える。また  $\text{Ho}^{13+}$ ,  $\text{Ho}^{14+}$ ,  $\text{Ho}^{15+}$  の電子配置における発光線の原子番号依存性の研究や紫外領域の分光実験を行い、新たな実験的成果を納めることも遷移同定に向けた有用な手段であると考えられる。

#### 4 結論

本研究は、 $4f$  重元素多価イオンの微細構造準位の構造を理解することを目的として、発光線の原子番号依存、価数依存を系統的に調べた。対象とした元素は、Ho、Er、Tm の 3 元素であり、銀様、カドミウム様、インジウム様

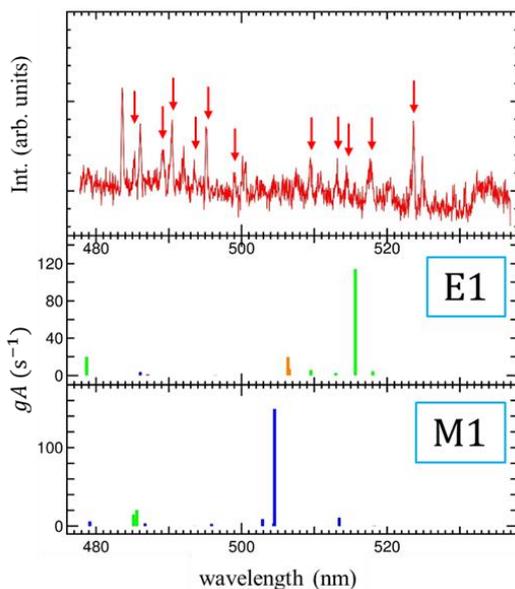


図 9  $\text{Ho}^{14+}$  における測定結果と理論計算の比較。上段が測定結果、中段が E1 遷移、下段が M1 遷移をそれぞれ表している。色別で表示されている遷移はそれぞれ、赤棒が  $4f^6 5s \ ^8F_j$  準位を終状態とする E1、M1 遷移、青棒が  $4f^6 5s \ ^6F_j$  準位を終状態とする E1、M1 遷移、橙棒が  $4f^5 5s^2 \ ^6H_j$  準位を終状態とする E1、M1 遷移、黄緑棒が  $4f^5 5s^2 \ ^6F_j$  準位を終状態とする E1、M1 遷移である。

の 3 つの等電子系列において発光線の帰属イオン同定および遷移同定を行った。また  $\alpha$  変動検知実験に向けて、今回  $\text{Ho}^{14+}$  の発光線の探索および理論計算[10]の検証を目指した。

銀様、カドミウム様等電子系列では、遷移同定ならびに発光線の原子番号依存性の確認に成功した。ただしカドミウム様では本研究で未観測となった発光線が存在するため、今後はそれらの観測を主とした測定を行うなどして更なる構造理解に努めていく必要がある。続いてインジウム様等電子系列では、発光線の帰属イオン同定を成功させられたが、遷移同定や原子番号依存性の確認には至らなかった。測定結果と理論計算の間で多くの不一致が見られたほか、異なる手法を用いた計算の間でも大きな差異が見られた。今後はそれらの原因究明を進めていく必要がある。また 3 つの等電子系列に対して原子番号の範囲を広げた依存性の議論を進めていくことも  $4f$  開設の構造理解を深めるうえで重要であると考えられる。

$\text{Ho}^{14+}$  に関する実験では、 $\text{Ho}^{13+}$ ,  $\text{Ho}^{15+}$  を含め多数の発光線の帰属イオン同定にも成功した。理論計算との比較による遷移同定には至らなかったが、観測例の無かった  $\text{Ho}^{13+}$ ,  $\text{Ho}^{14+}$ ,  $\text{Ho}^{15+}$  において非常に重要な実験的基礎を築くことができた。今後は理論計算の検証を進めていくと同時に、新たな実験的事実の構築と遷移同定に向けて  $\text{Ho}^{13+}$ ,  $\text{Ho}^{14+}$ ,  $\text{Ho}^{15+}$  の電子配置における発光線の原子番号依存性の研究や、紫外領域の分光実験などを視野に入れて研究を進めていく必要があると考える。

#### 参考文献

- [1] Z. Fei, R. Zhao, *et al.*, Phys. Rev. A 86, 062501 (2012).
- [2] Z. Fei, W. Li, *et al.*, Phys. Rev. A 90, 052517 (2014).
- [3] Yuri Ralchenko, Plasma Fusion Res. 8, 2503024 (2013)]
- [4] A. Derevianko, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 109, 180801 (2012)
- [5] V. A. Dzuba, *et al.*, Phys. Rev. A 86, 054501 (2012).
- [6] V. A. Dzuba, *et al.*, Phys. Rev. A 87, 029906(E) (2013).
- [7] J. C. Berengut, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 105, 120801 (2010).
- [8] J.-P. Uzan, Rev. Mod. Phys. 75, 403 (2003)
- [9] T. Rosenband *et al.*, Science 319, 1808 (2008)
- [10] V. A. Dzuba, *et al.*, Phys. Rev. A 91, 022119 (2015)
- [11] U.I. Safronova: private communication.
- [12] Zhao R, *et al.*, Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 47 (2014) 185004.
- [13] U.I. Safronova.: private communication.
- [14] Z. Fei, W. Li, J. Grumer, *et al.*, Phys. Rev. A. 90, 052517 (2011).
- [15] 中島貴之氏 卒業論文、電気通信大学 (2015)
- [16] M.S. Safronova.: private communication.