

# ホルミウム多価イオンの発光線の観測

中村信行研究室 島谷太一

## 1. 序論

今日までの物理学は、物理定数を不変とみなしたうえで様々な現象を定義してきたが、近年その物理定数が変化していることが示唆されており、その一つが微細構造定数( $\alpha = e^2/\hbar c$ )である[1]。 $\alpha$ の経年変化を確かめる方法の一つに、光学遷移周波数の精密測定がある。最新の実験では、 $\alpha$ 依存性の異なる $\text{Al}^+$ と $\text{Hg}^+$ の遷移周波数を比較することで、 $\alpha$ の値が $10^{-17}$ /年程度の範囲で変化しないことが実証された[2]。

さらに高い精度で $\alpha$ の経年変化を探るため、多価イオンを使った遷移周波数の精密測定が注目されており[3]、中でも $\text{Ho}^{14+}$ は可視領域に有用な遷移をもつとして $\alpha$ 変動検知実験への利用が提案されている[4]。

Dzubaらにより該当の遷移周波数が理論的に求められたが[4]、無数の微細構造準位をもつ複雑な多電子イオンのエネルギー準位を正確に計算するのは容易ではないため、実験による検証が必要となっている。

そこで本研究では、多価イオン源である電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap : EBIT) を用いて $\text{Ho}$ 多価イオンの分光測定をし、 $\text{Ho}^{14+}$ の可視領域遷移の探索を行った。

先行研究[5]では、発光線の帰属イオンを正確に同定するため、発光線観測と同時に飛行時間測定を行い、EBITで生成されたイオンの価数分布が測定された。この価数分布と発光線強度の電子ビームエネルギー依存性を比較することにより、 $\text{Ho}^{14+}$ が支配的

に生成される電子ビームエネルギーの決定及びその発光線が観測された。

本研究では、先行研究で観測された $\text{Ho}^{14+}$ の発光線の遷移準位を同定することを目的とし、 $\text{Ho}^{14+}$ の発光線の電子ビームエネルギー依存性を細かく測定した。

## 2. 実験装置

### 2.1 電子ビームイオントラップ

$\text{Ho}$ 多価イオンは、図1で示した小型EBIT (Compact EBIT : CoBIT)で生成した。EBITは、電場によってイオンを閉じ込め、そこに電子ビームを衝突させて価電子を逐次的に電離させることで多価イオンを生成する。トラップ領域に導入された原子は電子ビームの衝突を受けてイオン化し、ドリフトチューブ(Drift Tube : DT)と呼ばれる円筒電極が作る井戸型ポテンシャルと電子ビームが作る空間電荷ポテンシャルで3次元的に閉じ込められる。生成された多価イオンの発光線は、トラップ領域に設けられたスリットより観測される。

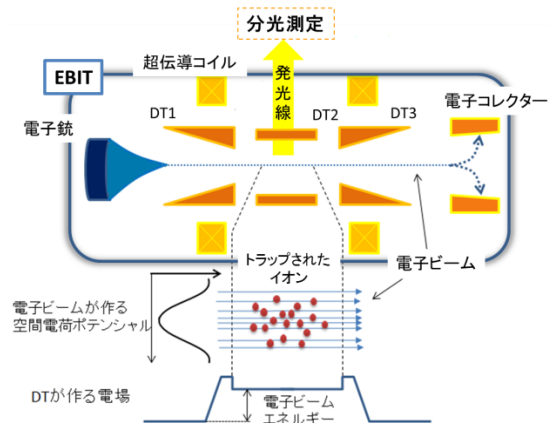


図1：電子ビームイオントラップの概略図

## 2.2 可視分光器

本実験で用いた可視分光器の配置図を図2に示す。DT内のイオントラップ領域で生成された多価イオンからの発光はCoBIT外に取り付けられた両凸レンズでスリットに集光され、そこから2つの凹面鏡と回折格子を経由してCCDカメラに結像される。検出する光の波長領域は、回折格子を回転させることで調節した。

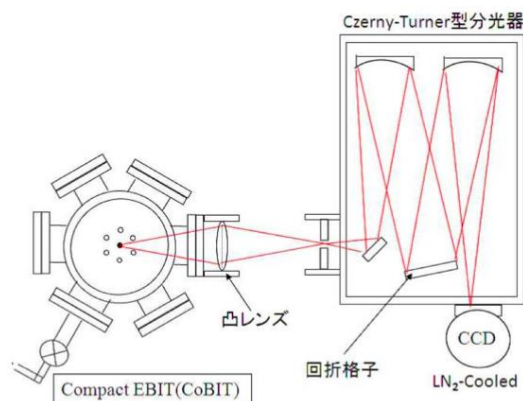


図2: 可視分光器の配置図[5]

## 3. Ho<sup>14+</sup>の発光線強度の電子ビームエネルギー依存性

電子ビームエネルギー  $E_e \approx 260 \sim 290 \text{ eV}$  における  $\text{Ho}^{14+}$  の励起過程は、(A)  $\text{Ho}^{14+}$  の基底状態から励起する場合と (B)  $\text{Ho}^{13+}$  の基底状態から電離と同時に励起する場合が主に考えられる。図3は  $\text{Ho}^{14+}$  が可視光線を放出する過程をエネルギー準位図を用いて模式的に表したものである。図中の  $I_n (n = 13, 14)$  はイオン化エネルギー、 $E_e$  は電子ビームエネルギー、(A)', (A)'' と (B)' はそれぞれ過程 (A) と (B) で励起した電子が脱励起する過程である。

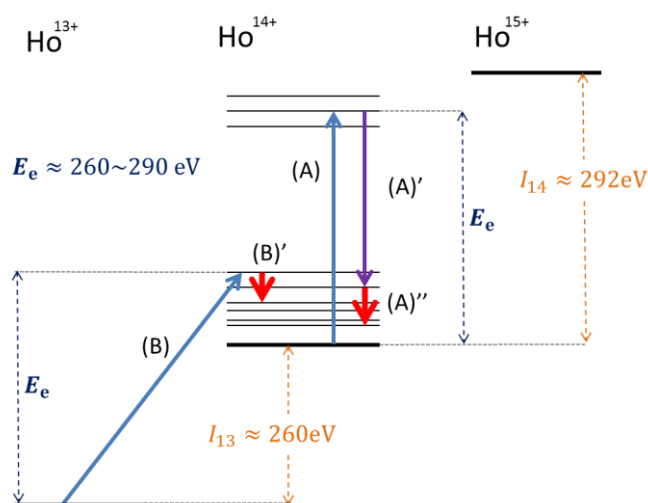


図3:  $\text{Ho}^{14+}$ が可視光線を放出する過程

励起過程(A)において、 $E_e \approx 260 \sim 290 \text{ eV}$  の電子ビームの衝突を受けた電子は、 $\text{Ho}^{15+}$  の基底状態付近の高エネルギー準位まで励起される。そこから、放射遷移によって脱励起する際、遷移確率が遷移周波数の3乗に比例することを考慮すると、多過程(A)で励起した電子は低エネルギー準位に達するまでの脱励起過程(A)'で可視光線を放出する可能性が低い。脱励起過程(A)'でエネルギーの大きい遷移により紫外領域発光線を放出した電子は、その後低エネルギー準位間の遷移で可視領域発光線を放出すると考えられる。

一方、励起過程(B)で  $E_e \approx 260 \sim 290 \text{ eV}$  の電子ビームの衝突を受けた電子は、 $\text{Ho}^{14+}$  の基底状態からおよそ  $0 \sim 30 \text{ eV}$  の低エネルギー準位に励起する。過程(A)と異なり、低エネルギーの励起準位にある電子はエネルギーの大きい遷移を起こせないため、低エネルギー準位間の遷移(B)'で放出する発光線は可視光領域である可能性が高い。

ここで、2つの発光過程について電子ビームエネルギー依存性を考える。

図3では省略されているが、7つの価電子をもつ $\text{Ho}^{14+}$ は無数の励起準位を持つため、過程(A)で高エネルギー準位まで励起した電子は、過程(A)'で無数の中間準位を経由しながら脱励起する。よって、電子ビームエネルギー $E_e$ が変化して励起準位が多少変わったところで、最終的に過程(A)'で放出される可視領域発光線の強度は電子ビームエネルギー依存性を示さないと考えられる。

対して、 $\text{Ho}^{14+}$ の低エネルギー準位に励起する過程(B)では、 $E_e$ の変化に伴って遷移(B)'の上準位が5eVずつ上昇する。これにより起こりうる遷移(B)'も変化するため、可視領域発光線の強度に電子ビームエネルギー依存性が現れると考えられる。すなわち、観測される可視光線強度の電子ビームエネルギー依存性は、主に遷移(B)'に起因するものである。

以上を踏まえて遷移過程(B)'のみを考える。図4は、 $\text{Ho}^{14+}$ の低エネルギー準位を模式的に表した図である。図4(a)に示したように、エネルギー準位において相対的な位置が異なる2つの遷移では、電子ビームエネルギーの変化に対して、発光強度が図5(a)のようになると予想できる。一方、図4(b)に示したように、相対的な位置に近い2つの遷移は、電子ビームエネルギーに対する発光線の強度変化が図5(b)のようになると考えられる。

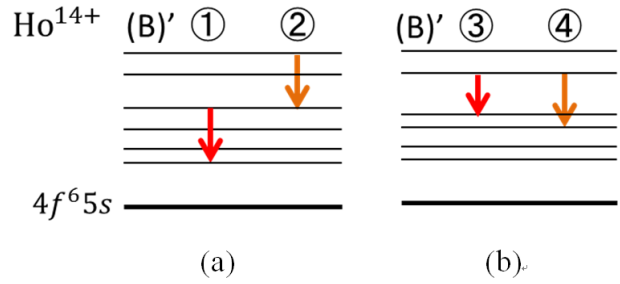


図4： $\text{Ho}^{14+}$ の低エネルギー準位間で起こる遷移

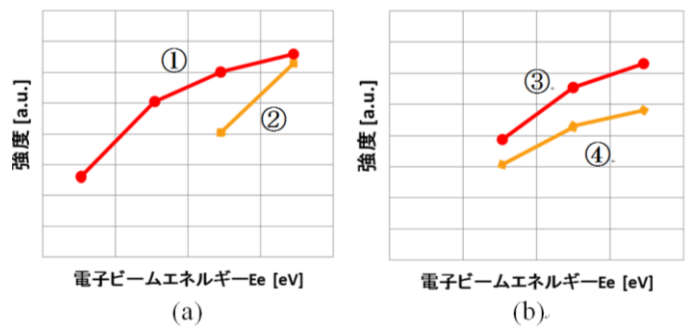


図5：発光線強度の電子ビームエネルギー依存性

測定を行った359-645nmで $\text{Ho}^{14+}$ の発光線強度について電子ビームエネルギー依存性を調べたところ、以上で予想したような電子ビームエネルギー依存性を示す発光線がいくつか確認された。図6,図7はその一例で、図8,図9はそれぞれの発光線強度を電子ビームエネルギーの関数としてグラフにしたものである。図8では、発光線強度の電子ビームエネルギー依存性が図5(a)のような挙動を示している。これらは、遷移同士がエネルギー準位において相対的に異なる位置関係にあると考えられる組である。また、図9は、図5(b)のような挙動を示した発光線の組である。これらは、遷移同士が相対的に近い位置関係にあると考えられる。

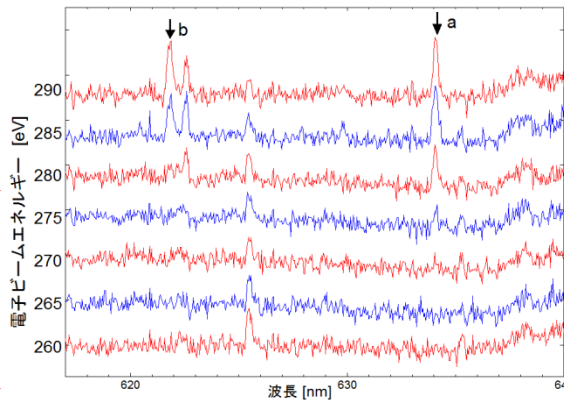


図 6 : 617-640nm における Ho 多価イオンの発光線

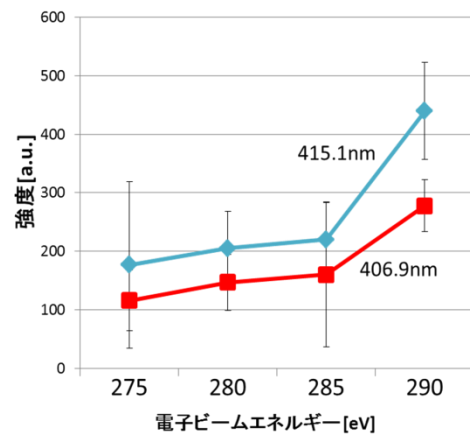


図 9 :  $\text{Ho}^{14+}$  の発光線強度の電子ビームエネルギー依存性

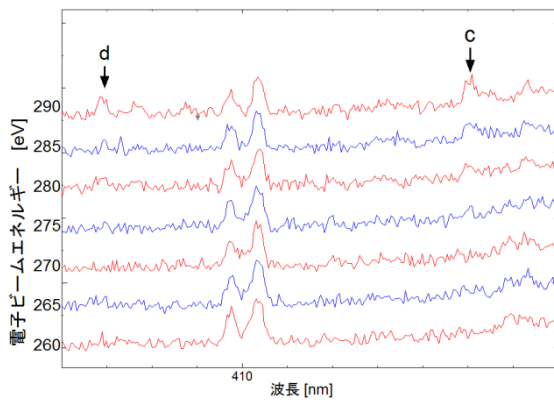


図 7 : 406-417nm における Ho 多価イオンの発光線

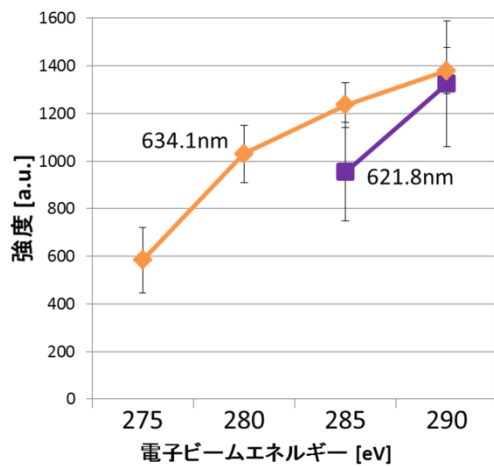


図 8 :  $\text{Ho}^{14+}$  の発光線強度の電子ビームエネルギー依存性

#### 4. まとめと展望

本研究では、 $\text{Ho}^{14+}$  の発光線の電子ビームエネルギー依存性を調べることで、いくつかの発光線について遷移同士のエネルギー準位における相対的な上下関係を知ることができた。

今後は、電子ビームエネルギー依存性を調べる方法以外で  $\text{Ho}^{14+}$  の遷移を探索しようと考えている。

#### 参考文献

- [1] J.-P. Uzan, Rev. Mod. Phys. 75, 403 (2003).
- [2] T. Rosenband et al, Science 319, 1808 (2008)
- [3] J. C. Berengut, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, Phys. Rev. Lett, 105,120801(2010)
- [4] V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, Phys. Rev. A, 91,022119 (2015)
- [5] 中島貴之 卒業論文, 電気通信大学 (2014)