

# ホルミウム多価イオンの可視領域発光線の高分解能測定

中村信行研究室 緒方海都

2023年3月7日

## 1 序論

原子は正の電荷と負の電荷が等しく全体としては中性だが、電子を取り去り、正の電荷が多くなったものを(正の)イオンと呼ぶ。電子を多数取り去り、正の電荷が多いイオンは「多価イオン」と呼ばれる。また、電子を  $m$  個取り去ったものを  $m$  価の多価イオンと呼び、その電子の個数をイオンの「価数」と呼ぶ。例えば、 $X$  という原子の  $m$  価の多価イオンは、 $X^{m+}$  と表される。例えば、原子番号 79 の Au (金) は電子を 79 個持っているが、そこから電子を 2 個取り去ったものを金の 2 価イオンと呼び、 $Au^{2+}$  と表記する。さらに電子を取り去り、残りの電子が 1 個になったイオン  $Au^{78+}$  は、電子の配置が水素と同じであるため水素様金イオンと呼ぶこともある。

近年、ニオブ、ホルミウム、プラセオジウムなど種々の金属多価イオンの禁制遷移に起因する可視域発光線を利用することで、既存のものよりも高精度な原子時計を開発する提案が活発に行われている [1]。中島貴之 修士論文 (2017) では、そのような多価イオンのエネルギー構造を理解することを目的として、原子時計の利用候補であり、微細構造定数  $\alpha$  変動検知に注目されている  $Ho^{14+}$  の可視域発光線測定を行い、非常に多くの発光線の帰属イオン同定に成功した。

$\alpha$  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り、式 (1) で定義される。

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad (1)$$

ここで  $e$  は電子の素電荷、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $\hbar$  はプランク定数を  $2\pi$  で割った量、 $c$  は光速度をそ

れぞれ表している。

本研究の目的は、その提案の中で有力候補のひとつである  $Ho^{14+}$  の発光線を高分解能観測し、その超微細構造を確認することである。超微細構造とは原子核スピン磁気モーメントによるエネルギー準位の分裂である。

## 2 実験

### 2.1 小型電子ビームイオントラップ [CoBIT]

我々の研究室では、多価イオンの分光研究のために、独自に多価イオンを生成する装置「電子ビームイオントラップ装置 (EBIT)」を使用し研究を行っている。EBIT は、電子ビームにより多価イオンを効率よく生成し、それを閉じ込めることが可能である。また、専用の分光器を用いて、生成した多価イオンからの発光を高精度に計測できる。さらに、入射する電子ビームのエネルギーを変えることにより、生成する多価イオンの価数を制御できる。このような利点を持つ EBIT を用いて、価数などを制御して生成した多価イオンからの発光を調べ、多価イオンに関する基礎データを集めている。

図 1 に EBIT の概要を示す。EBIT は電子銃、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。多価イオンは DT 内でトラップされ、電子ビームによって逐次電離を起こすことで生成される。EBIT 内で生成された多価イオンの発光を分光して観測したり、引き出しによって価数分布を得ることで特性を理解できる。

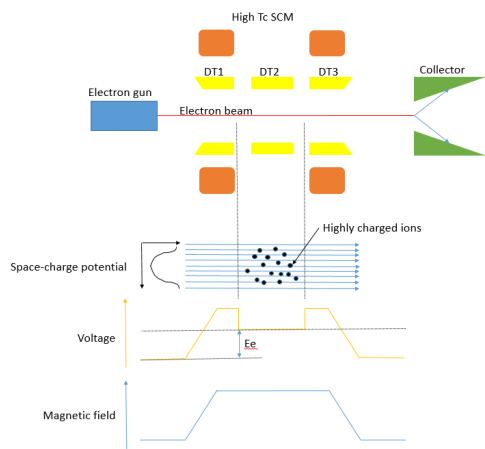


図1 EBITの主要構成物の配置図。図左から電子銃、ドリフトチューブ電極(DT1、2、3)、電子コレクター電極、DT電極を囲うようにヘルムホルツ型超電導コイルが配置されている。

小型電子ビームイオントラップ(Compact EBIT: CoBIT)は、研究室で所持するもう一つの大型EBIT(Tokyo-EBIT)の原理をそのままに小型化した装置である。図2にCoBITの断面図を示す。Tokyo-EBITは高エネルギー運転による高価数の多価イオン生成に適しているが、低エネルギーでの運転を行うと電子ビームが安定しない。CoBITは低エネルギーでの運転に適した装置であるため、低価数の多価イオンの生成に向いている。

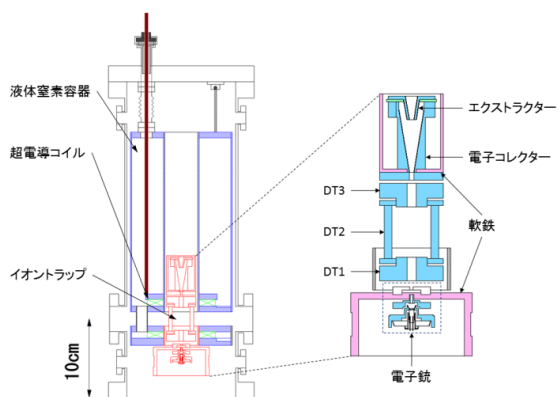


図2 CoBITの断面図 [3]

## 2.2 可視分光器

本研究で使用した可視分光器とCoBITの配置図を図3に示す。本研究では可視領域スペクトルを観測するためにHORIBA Scientific製分光器のiHR550を用いた。この分光器はCzerny-Turner型分光器で、主に反射型平面回折格子、コメリット凹面鏡、結像凹面鏡から構成されている。分光器の入射スリットを通った光はコメリット凹面鏡によって平行光となり、回折格子によって分散される。分散された光は結像凹面鏡によってCCDに集光される。観測波長域の変更は回折格子の角度を回転させることで行われる。CCDはAndor製のiDUS416Seriesを用いている。

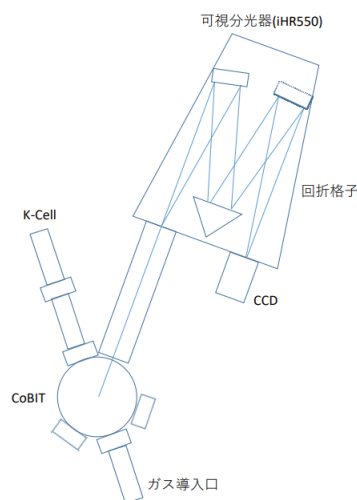


図3 可視分光器の配置図

## 2.3 測定

本研究では、CoBITに蒸発セル(Kセル)からホルミウムを導入することでホルミウム多価イオンを生成し、その可視域発光を可視分光器によって観測した。

## 3 結果と考察

### 3.1 銀様多価イオンの発光線測定

まず、 $\text{Ho}^{14+}$ の発光線測定の前にホルミウム導入の試験として比較的発光線強度の高いとされる銀

様  $\text{Ho}^{20+}$  の発光線測定を行った。2023 年 1 月 12 日に実験で得られたデータと 2023 年 1 月 18 日に得られたデータの比較のグラフを図 4 に示す。

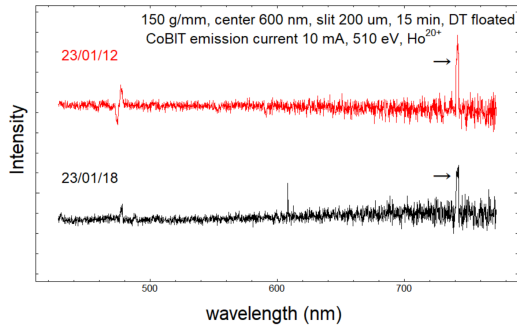


図 4  $\text{Ho}^{20+}$  の発光線

図 4 から、 $\text{Ho}^{20+}$  の発光線が確認された。しかし、発光線強度が 1 月 12 日に測定されたものよりも小さくなっていることが分かる。これは 1. K セル内の試料が減っていること 2. 分光器の位置のずれが原因だと考えた。

$\text{Ho}^{20+}$  の発光線が確認できたので、本研究の目的である  $\text{Ho}^{14+}$  の発光線を測定するためにビームエネルギーを 320eV に変更した。ビームエネルギーが 510eV と 320eV のデータを図 5 に示す。

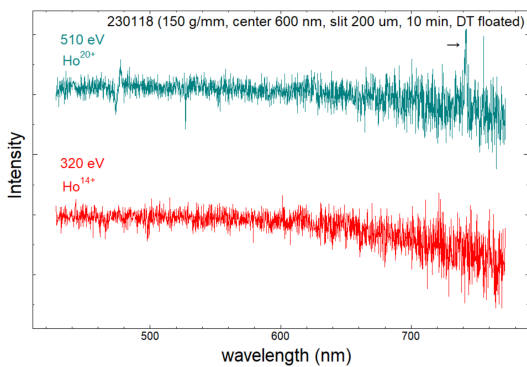


図 5  $\text{Ho}^{14+}$  の発光線

図 5 から、ビームエネルギーが 320 eV の時、 $\text{Ho}^{14+}$  の発光線が確認できなかった。発光線が出ない原因としては、 $\text{Ho}^{20+}$  の発光線が観測されたものの強度が弱かったため、多価イオンの数が少なかったからであると考えられる。

### 3.2 分光器の位置調整

発光線測定の効率を上げるために、分光器の位置調整を行った。それにより、集光レンズの焦点とスリット位置を一致させることで、観測の効率を上げることができる。調整では、Ne ガスを直接 CoBIT 内に導入し、発光線を確認した。スリット位置の調整をする前と後の比較のグラフを図 6 に示す。

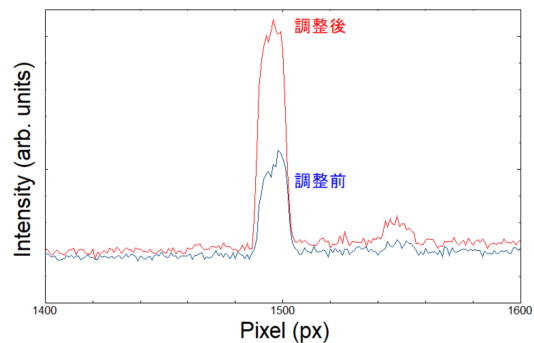


図 6 スリット位置調整前後の発光線強度

図 6 から Ne の発光線の強度が、分光器位置の調整をする前と比べて約 2 倍になった。測定の効率が上がったので 3.1 と同様の測定に入る。

まず、電子ビームエネルギーを変化させることで得られる発光線の変化を確認するために、500 eV、510 eV、520 eV、530 eV とした。そのときの発光線測定の結果を図 7 に示す。図 7 から、 $\text{Ho}^{20+}$  の発光線が確認できなかった。

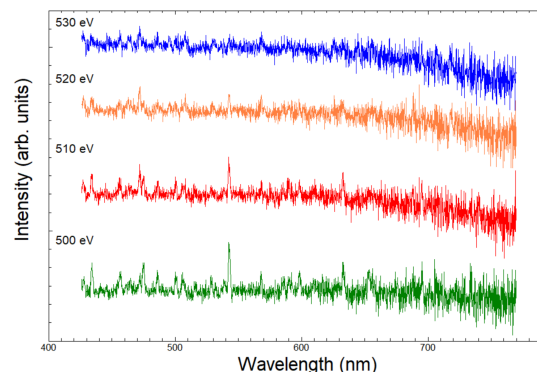


図 7 発光線の電子ビームエネルギー依存性

### 3.3 Kセル内の Ho 試料の交換

3.2の結果から、導入する試料の確認を行ったところ、Kセル内の Ho 試料はすでに無くなっており、空であった。そこで Ho 試料を新たに入れ直し、そのうえで Kセルの温度を変化させ、510 eV で  $\text{Ho}^{20+}$  の発光線を測定した。その結果を図 8 に示す。図 8 から、 $\text{Ho}^{20+}$  の発光線が確認できなかった。その理由については考察しているが現段階では不明である。

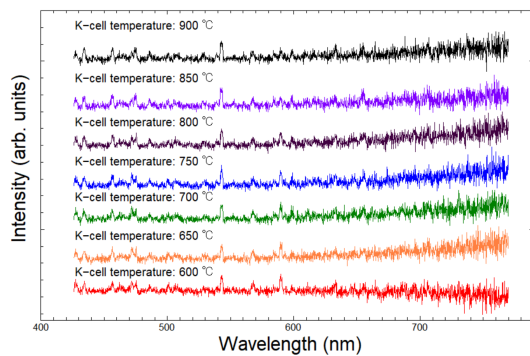


図 8 電子ビームエネルギー 510 eV での Kセル温度依存性

## 4 結論

本研究では、ホルミウム多価イオンの可視領域発光線の高分解能測定を目的とし、比較的発光線強度の強い銀様多価イオンとカドミウム多価の高分解能測定から始めた。しかし、銀様多価イオンの発光線を一度確認できたもののその後の測定ではホルミウムの発光線を確認できなかった。結果的に、この実験の最終目標であるホルミウム多価イオンの発光線の超微細構造は観測できなかった。分光器の位置調整、Kセル内の試料確認、Kセルの整備を行ったが明確な原因を見出すことができなかった。目的とするホルミウム多価イオンの高分解能測定による超微細構造観測のためには、さらに EBIT 条件や Kセル条件の最適化を行う必要があると考えられる。

## 参考文献

- [1] M. G. Kozlov, M. S. Safronova, J. R. Crespo López-Urrutia, and P. O. Schmidt, Rev.

Mod. Phys. 90, 045005 (2018)

- [2] 市川行和・大谷俊介 (2012) 『原子分子物理学ハンドブック』 朝倉書店  
[3] 菊池浩行氏 修士論文 (2007) 電気通信大学