

# 飛行時間測定法による多価イオンの価数分析

中村研究室 中島貴之

## 1 序論

現在の物理学は物理定数が一定不変であることをもとに成り立っているが、予てよりその物理定数が経年変化する可能性が示唆されている[1]。その変化を観測するにあたって現在行われている方法の一つに、原子時計に使われる光学遷移周波数の精密測定により微細構造定数( $\alpha = e^2 / \hbar c$ )の時間変化をみるというものがある。この方法を使った現在最も高い精度をもつ結果は、 $\alpha$ に大きく依存する遷移を持つHg<sup>+</sup>とそうでないAg<sup>+</sup>をそれぞれ使った2つの原子時計の周波数を数年にわたって計測、比較することで得られたもので、そこでは $\alpha$ は10<sup>-17</sup>/年程度の範囲で変化しないことが実証されている[2]。

より高い精度で $\alpha$ の経年変化の観測する方法として、近年多価イオンが注目されている[3]。高精度測定に適するいくつかの多価イオンが提案されているが[4]、昨年、Dzubaら[5]はHo<sup>14+</sup>における可視領域の遷移の利用を提案した。Ho<sup>14+</sup>の持つ有用な遷移の波長は昨年彼らによって理論的に求められているが、多電子を持つ多価イオンのエネルギー準位を精密に計算することは困難であるため、実験的観点からその計算の検証が求められている。

そこで我々は、小型の電子ビームイオントラップ(Compact EBIT: CoBIT)と呼ばれるイオン源を用いた Ho 多価イオンの分光実験を行った。EBIT は単色性の極めて高いエネルギーを持った電子ビームによる逐次電離で多価イオンを生成するが、その原理上、Ho<sup>14+</sup>イオンのみを生成することはできず、複数の価

数のイオンが同時に生成され、それらからの発光線が同時に観測される。これまで我々の研究室では、観測される発光線の強度の電子ビームエネルギー依存性を調べることで発光線の価数同定を行ってきたが、本研究ではより正確な同定を行うため、まず飛行時間測定法を用いて CoBIT で生成されたイオンの価数分布の測定を行った。この価数分布測定と可視領域での分光測定を同時に行うことで Ho<sup>14+</sup>からの発光線を同定し、Dzuba らによる理論計算の実験的検証を目指した。

## 2 飛行時間測定法

飛行時間測定法は、主に粒子の質量分析に用いる手法である。この方法は荷電粒子を加速させ、その飛行時間を測定することで対象の質量を測定する。荷電粒子の場合、既知の電場を印加させれば粒子は荷電状態(価数)に応じた運動エネルギーを受け加速される。普通は2個の検出器を一定の距離を置いて設置し、加速された粒子がそこを通過する時間を電氣的に測定することで速度もしくはエネルギーが分かるため質量が求まる。荷電粒子の飛行時間は

$$t = \frac{l}{\sqrt{2eV}} \sqrt{\frac{m}{q}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで $e$ は電気素量、 $V$ は印加した電圧、 $q$ は多価イオンの価数、 $m$ はその質量、 $l$ は多価イオンの飛行距離をそれぞれ表す。

本研究では、質量電荷比の平方根に依存する飛行時間に着目して電子ビームエネルギーを変え、多価イオンの検出器までの飛行時間

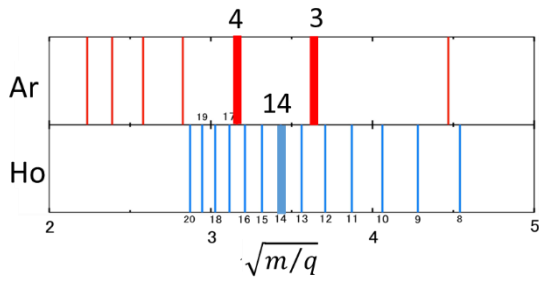


図 1 : Ar と Ho の価数と飛行時間の計算値

の違いからその価数分析を行った。EBIT で生成される多価イオンには様々な価数のものが含まれているが、式(1)からもわかるように同じ元素(つまり  $m$  が一定)であれば価数  $q$  が高いもの(高価数)から早く検出器に到着するため価数の分析が可能となる。

図 1 は Ar と Ho の価数と飛行時間の関係と比較した計算結果である。これから我々が注目している  $\text{Ho}^{14+}$  は  $\text{Ar}^{4+}$  と  $\text{Ar}^{3+}$  の間の飛行時間を持つことが分かったため、本研究では  $\text{Ar}^{4+}$  と  $\text{Ar}^{3+}$  の飛行時間を Ho 多価イオンの価数分析の較正に使った。

### 3 実験装置

#### 3.1 飛行時間測定装置

飛行時間測定法に用いた実験装置の概略図を図 2 に示す。CoBIT のトラップ領域からバンチ状ビームとして引き出された多価イオンはエクストラクター電極と DT2 の電位差により加速された後、アインツェルレンズで収束されて静電偏向器に入射する。同時にアインツェルレンズ内の 2 つのディフレクターが全体として 2 方向への偏向の微調整を可能としている。

静電偏向器に入射した多価イオンビームは  $90^\circ$  方向まで偏向されてから検出器に入射する。ビームを  $90^\circ$  まで偏向させることで、電子コレクターが電子を吸収するときに発生す

る軟 X 線とイオンを分離している。そして、検出器に用いたマイクロチャンネルプレート (MCP) がイオンが入射した際に生じる二次電子を二次電子増倍管で増幅させて出力し、その電流をオシロスコープが電圧に変換して各測定結果を表示する。オシロスコープのトリガはパルス波形発生器のトリガと同期され、多価イオンが引き出された瞬間から測定結果を表示させるようにした。その際、価数分析の較正用の  $\text{Ar}^{4+}$  と  $\text{Ar}^{3+}$  の飛行時間に該当する電圧の変動を重点的に表示させた。

次に多価イオンを引き出す際に用いた装置の配線を図 3 に示す。DT1,3、増幅器、任意波形発生器そして受信機は DT2 の電位上に設置されている。今回は DT2 の電圧は 400V に設定され、DT1,3 はそれぞれ 50V と 30V に設定された。そのため最終的にトラップ領域

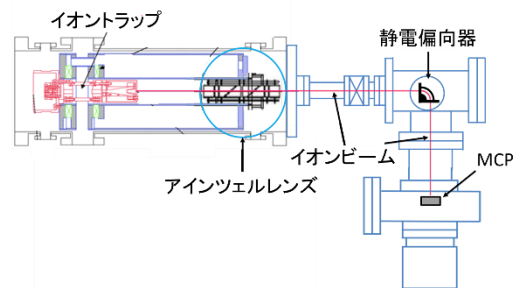


図 2 : 多価イオンビーム

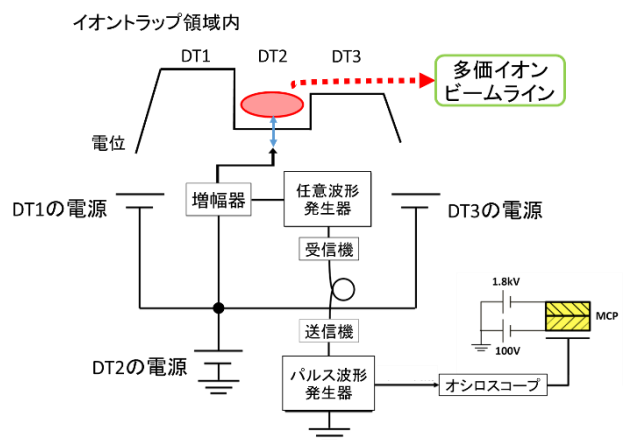


図 3 : 多価イオン引き出し配線図

で形成される井戸型ポテンシャルの電位配置は順に 450V, 400V, 430V となる。本測定では、DT2 の電位を周期的に押し上げることでトラップされた多価イオンを引き出した。その際に印加したパルス状電圧の設定について述べる。まず、パルス波形発生器で矩形波を設定し多価イオンの引き出す周期を決定した。この周期は、トラップ領域内での逐次電離の進行を考慮して、比較的低価数の多価イオンを生成させたい Ar に対しては 50Hz と短めに設定し、14 価を生成させたい Ho の場合は Ar より長い 0.1 Hz に設定した。

パルス波形発生器から出力された周期をもとに任意波形発生器で三角波を設定した。この三角波は高さが 5V で幅が 10 $\mu$ s とした。また波形発生器間は光ファイバーで繋がれており、はじめに設定された周期を送信機が光信号に変換し、受信機がその光信号を再び電気信号に変換して任意波形発生器に入力させた。光ファイバーにより同期信号を送受信するのは、パルス波形発生器が接地電位にあるのに対し任意波形発生器が DT2 電位上にあるためである。そして、任意波形発生器で設定された三角波が増幅器で 100 倍まで増幅されたのち、最終的に DT2 の電位の上に印加される形で出力された。

### 3.2 可視分光器

本研究で使用した可視分光器の配置を図 4 に示す。CoBIT のトラップ領域からの多価イオンの発光は外に取り付けられている両凸レンズによって分光器内のスリットに集光される。スリットに集光された光はその後図 4 にあるように 2 枚の凹面鏡と回折格子を経て背面照射型 CCD カメラに入射し検出された。

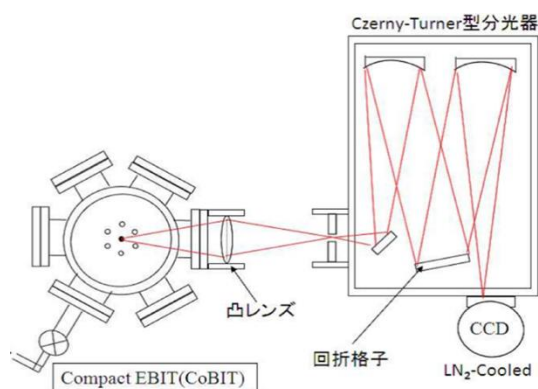


図4：可視分光器

### 4 Ho の飛行時間測定

図 5 に Ar の飛行時間測定で得られた結果を示す。縦軸は表示に使うオシロスコープの電圧を表し、横軸が時間を表している。下から電子ビームエネルギー  $E_e$  が 290eV から 10eV ずつ 350eV まで変化させた各場合の結果を示している。そして、それぞれの結果において電圧が立ち上がっている地点が MCP で多価イオンが検出された到達時刻を表しており、それぞれの到着時間の差から図 5 のように価数分析することができた。

また、各電子ビームエネルギーにおける各価数のイオンの飛行時間に着目すると、電子ビームエネルギーが上がるにつれて各イオンが全体的に速く MCP に検出される傾向があることが分かる。本来であれば飛行時間測定で検出される飛行時間は飛行距離が一定であれば変わらないはずである。このずれが起きた原因に電子ビームエネルギーの違いが考えられる。電子ビームエネルギーは DT2 電位を一定にしつつ、電子銃の電位を変化させることによって指定したが、コレクターやエクストラクタなどのイオンが通過する電極の電位も電子銃電位上にあるため変化してしまう。そのため、最終的な MCP までの到着時間に影響を及ぼしたと考えられる。今回は  $E_e =$

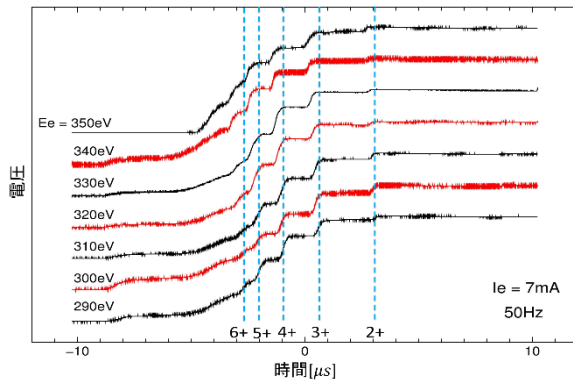


図5: Arの飛行時間測定結果

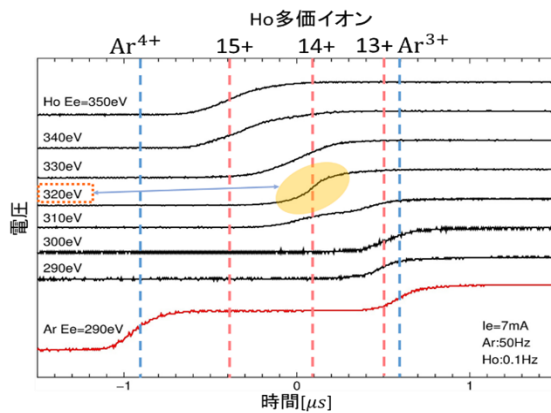


図6: Hoの飛行時間測定結果

290eVのときの $\text{Ar}^{3+}$ の到着時間を基準にして各エネルギーでその到着時間が一致するように修正した。Hoの測定結果においては、電子ビームエネルギーが対応するArの測定結果の修正量と同じ分だけ修正して価数分析を行った。その結果を図6に示す。一番下の赤い線がArの測定結果、その上に並んでいる黒い線がHoの測定結果である。両端の青い点線が $\text{Ar}^{4+}$ と $\text{Ar}^{3+}$ の到達時間であり、先の計算結果から間の到達時間はそれぞれ $\text{Ar}^{3+}$ 側から $\text{Ho}^{13+}$ ,  $\text{Ho}^{14+}$ ,  $\text{Ho}^{15+}$ のものと価数分析することができた。そして、この結果から特に電子ビームエネルギーが320eVの場合に $\text{Ho}^{14+}$ が支配的に生成されているという結論を得ることができ、それをもとに可視領域の分光測定を行った。

## 5 Hoの可視分光測定

本測定では370 nm~590 nm付近の波長域における分光測定を行った。飛行時間測定の結果から320eVのときにのみ現れる発光線が $\text{Ho}^{14+}$ 由来と考えることができ、本測定では観測した発光線スペクトルから10本の発光線を確認することができた。

## 6 まとめと展望

Hoの飛行時間測定を行ったことで、本研究の対象としている14価がCoBITにおいて特に生成される電子ビームエネルギーを知ることができた。その結果をもとに分光測定を行い、10本の $\text{Ho}^{14+}$ 由来と考える発光線を確認することができたが、その詳細な中心波長の決定や遷移の同定まで解析が至らなかった。

今後は波長較正の精度向上を図るとともに、観測された発光線のガウシアンフィッティングを行うことで、より高精度に各発光線の中心波長を決定することが望まれる。また、同時に本測定の範囲外であった300 nm付近の発光線観測も行っていきたいと考えている。

## 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] J. C. Berengut, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, A. Ong, Phys. Rev. A **86**, 022517 (2012)
- [5] V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, H. Katori, arXiv:1411.0775 (2014)