

# Be 様 Ar イオンのプラズマアシストレーザー分光

中村信行研究室 宮 由輝

## 1 序論

### 1.1 電子ビームイオントラップ (EBIT)

EBIT の原理図を図 1 に示す。EBIT は電子銃、円筒状の電極であ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、電子コレクターで構成されている。DT は DT1、DT2、DT3 の 3 個に分割されている。DT1、DT2、DT3 には電圧を DT2 が DT1、

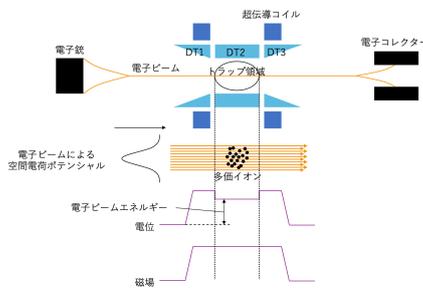


図 1 EBIT の原理図

DT3 より低くなるようにかけられ、図 1 中の電位配置のようになっている。この電位配置によって電子銃から出た電子ビームは加速され、超伝導コイルの磁場によって圧縮されながら DT に入射する。DT によってかけられた電圧により生成された多価イオンは軸方向にトラップされる。さらに電子ビームの空間電荷ポテンシャルによっても多価イオンは径方向にトラップされ、三次元的にトラップされていることになる。トラップ領域内のイオンは電子の衝突を受けて逐次電離が進み多価イオンが生成される。逐次電離とは一つずつ電子を電離させていく方法だが、目的価数のイオンを中性原子から生成しようとするとその価数までのイオン化エネルギーの総和が必要である。しかし逐次電離の場合は目的価数の一つ前の価数から目的価数にするためのイオン化エネルギーを与えれば良いので、低エネルギーで生成することができる。実験では中程度の価数のイオンを生成することを目的とした小型 EBIT (Compact EBIT: CoBIT) を使用した。

### 1.2 プラズマアシストレーザー分光法

プラズマアシストレーザー分光法は Y. Ralchenko 氏が 2017 年に提案し [1]、理化学研究所 木村直樹氏が実

証した分光法である [2]。ここで「プラズマアシスト」とは、EBIT における電子衝突などのプラズマ原子過程を利用し、準安定状態に有意な占有密度を保つことを意味する。この分光法は EBIT で生成、トラップされた準安定状態の多価イオンに対してパルスレーザーを照射して禁制遷移を起こし、その後のレーザー誘起蛍光 (Laser Induced Fluorescence : LIF) を観測するというものである。図 2 に示したのが本実験で対象とした  $\text{Ar}^{14+}$  のエネルギー準位図であるが、この場合図中オレンジ色矢印で示された遷移がパルスレーザーで起こされる遷移、青色矢印で示された遷移が LIF の遷移である。

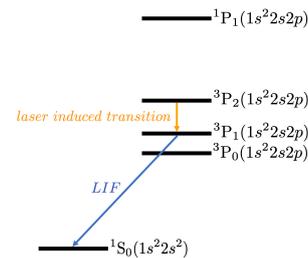


図 2  $\text{Ar}^{14+}$  のエネルギー準位図

この分光法ではレーザー遷移の遷移波長付近でレーザーの波長を掃引することで LIF の強度変化が見られ、その強度変化の様子からレーザーで起こされた禁制遷移の遷移波長を決定することができる。また LIF の強度を時間分解測定することで LIF の遷移の上準位の占有密度の時間変化を見ることができ、それによって準位の寿命を測定することが可能である [3]。

### 1.3 目的

本研究の目的は  $\text{Ar}^{14+}$  に対して時間分解プラズマアシストレーザー分光を行い、準位  $^3\text{P}_2 - ^3\text{P}_1$  間の遷移波長を測定することである。本研究手法はレーザーを用いた能動分光であるが、分光器で測定した受動分光との比較も行う。さらに求めた LIF スペクトルの線幅からプラズマ中のイオン温度測定を行う。また  $^3\text{P}_1$  の遷移寿命も測定し理論計算との比較を行う。

## 2 実験のセットアップ

### 2.1 TAC と MCA による測定

LIF スペクトルと寿命測定は図 3 のような装置を用いた。Ar<sup>14+</sup> を CoBIT で生成、トラップしパルスレーザーを照射する。レーザーは Nd:YAG レーザー Gigashot を励起光とした色素レーザー Cobra-Stretch を使用した。照射されたレーザー光はフォトダイオードに入射し、その信号が時間波高変換器 (TAC) の START へ入る。また CoBIT 中の Ar<sup>14+</sup> の発光は真空紫外 (VUV) 分光器で記録され、検出された信号は TAC の STOP 信号へ入る。TAC は START と STOP の時間差をそれに比例した波高に変換する装置であり、マルチチャンネルアナライザ (MCA) で波高についてのヒストグラムとする。つまり、レーザーの照射から Ar<sup>14+</sup> の検出までの時間を記録している。

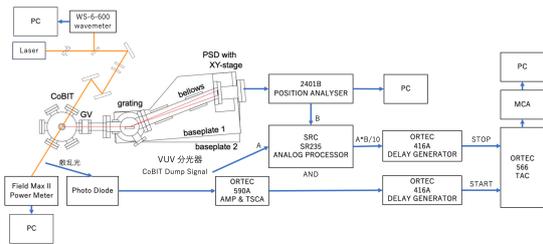


図 3 LIF スペクトルと準位 <sup>3</sup>P<sub>1</sub> の寿命測定に使用した実験装置の構成とフローチャート

### 2.2 可視分光器による測定

可視分光器による測定は図 4 のような装置を用いた。この装置は CoBIT で生成された Ar<sup>14+</sup> を VUV 分光器で確認しながら可視分光器で測定するものである。

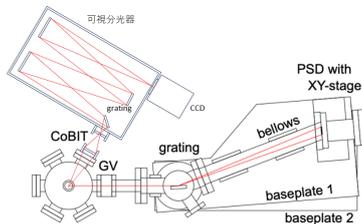


図 4 可視分光器による <sup>3</sup>P<sub>2</sub> - <sup>3</sup>P<sub>1</sub> の遷移波長の測定に使用した実験装置

### 2.3 MCS による測定

寿命測定の再実験には図 5 のような装置を用いた。この装置では TAC と MCA ではなくマルチチャンネル

スケーラ (MCS) を使用しており、レーザーの照射から Ar<sup>14+</sup> の検出までの時間を記録している。

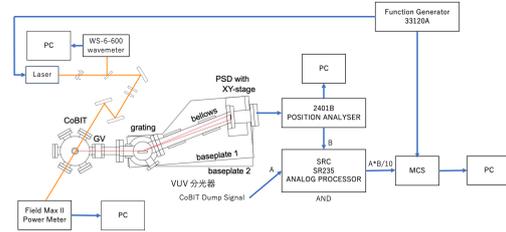


図 5 準位 <sup>3</sup>P<sub>1</sub> の寿命測定の再実験で使用した実験装置の構成とフローチャート

## 3 結果と考察

### 3.1 <sup>3</sup>P<sub>2</sub> - <sup>3</sup>P<sub>1</sub> 間の遷移波長測定

#### 3.1.1 LIF スペクトルによる測定

図 6 はレーザー波長が 594.5515293 nm の時の VUV スペクトルと時間分解測定の例を示している。図 6(a)

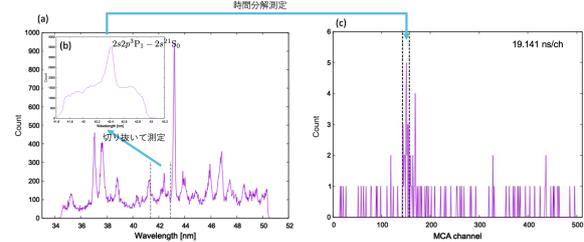


図 6 LIF スペクトル取得の流れ。(a)VUV 分光器の測定範囲全体を測定したスペクトル (5 分間) (b)Ar<sup>14+</sup> の <sup>3</sup>P<sub>1</sub> - <sup>1</sup>S<sub>0</sub> の発光線付近だけを切り取って測定したスペクトル (1 時間) (c)(b) を時間分解測定した様子 (1 時間)

は VUV 分光器の測定範囲全体を 5 分間測定したもの、(b) は Ar<sup>14+</sup> の <sup>3</sup>P<sub>1</sub> - <sup>1</sup>S<sub>0</sub> の発光線付近だけを切り取って 1 時間測定したものである。そして (c) は Ar<sup>14+</sup> の <sup>3</sup>P<sub>1</sub> - <sup>1</sup>S<sub>0</sub> の発光線を時間分解測定したものであり、レーザーが照射した後 LIF でカウントが増えて、徐々にカウント数が減衰している様子が見られる。LIF の強度は図 6(c) の点線内の範囲 (143-157 ch) にあるカウントの合計とした。一方で図 6(b) を見てわかるように目的の発光線とは異なるバックグラウンド成分があるので、その成分を取り除く必要がある。さらに長時間測定を続けるにつれ CoBIT 内の Ar<sup>14+</sup> の量やレーザーパワーの減少があるため、LIF スペクトルのデータは図 6(c) の点線内の合計カウント (LIF カウント) からバックグラウンドのカウントを引き、Ar<sup>14+</sup> の量とレーザーパワーで規格化したものとした。レーザー波長を掃引して得た結

果について、以上のデータ処理を実施すると図7のLIFスペクトルが得られる。フィッティングに使用した関数

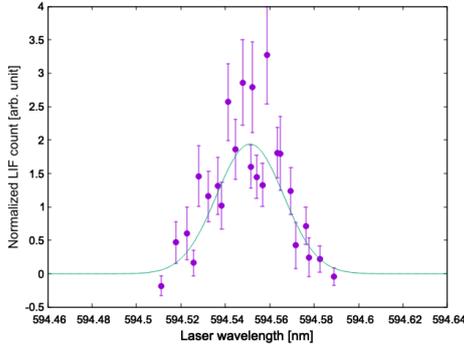


図7 LIF スペクトル

は  $f(x) = a \exp\{-4 \log 2(x-b)^2/c^2\}$  であり、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  はそれぞれガウス関数のピークの高さ、中心、半値全幅を示している。

遷移波長の不確かさ  $\Delta\lambda_{LIF}$  はフィッティングによる波長の不確かさ  $\Delta\lambda_{fitting,LIF}$ 、波長計によるレーザー波長の不確かさ  $\Delta\lambda_{laser,LIF}$  を用いて、

$$\Delta\lambda_{LIF} = \Delta\lambda_{fitting,LIF} + \Delta\lambda_{laser,LIF}$$

とした。結果として  $^3P_2 - ^3P_1$  間の遷移波長は 594.551(2) nm と求められた。

### 3.1.2 可視分光器による測定結果及び比較

可視分光器による測定で得られたスペクトルと LIF スペクトルとの比較を図8に示す。可視分光器による

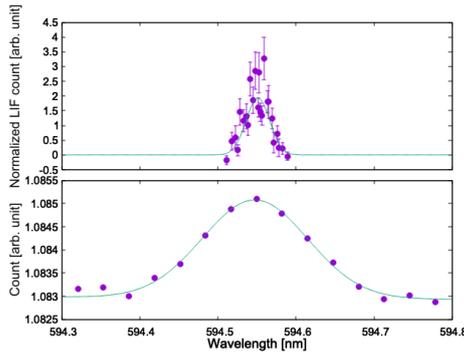


図8 LIF スペクトル(上)と可視分光器によるスペクトル(下)の比較

スペクトルのフィッティングに使用した関数は  $f(x) = a \exp\{-4 \log 2(x-b)^2/c^2\} + dx + e$  であり、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  はそれぞれガウス関数のピークの高さ、中心、半値全幅、 $d$ 、 $e$  はそれぞれバックグラウンドの一次関数の傾きと切片を示している。

遷移波長の不確かさ  $\Delta\lambda_{vis}$  はフィッティングによる波長の不確かさ  $\Delta\lambda_{fitting,vis}$ 、波長較正をした際に生まれる不確かさ  $\Delta\lambda_{calib.,vis}$ 、標準ランプの位置の再現性による不確かさ  $\Delta\lambda_{RPC,vis}$  を用いて、

$$\Delta\lambda_{vis} = \sqrt{(\Delta\lambda_{fitting,vis})^2 + (\Delta\lambda_{calib.,vis})^2 + (\Delta\lambda_{RPC,vis})^2}$$

とした。結果として  $^3P_2 - ^3P_1$  間の遷移波長は 594.55(4) nm と求められた。

遷移波長の文献値は 594.5526(2) nm であり [4]、矛盾のない値を求めることができた。さらに図8から LIF スペクトルが可視分光器によるスペクトルより細かい線幅で測定できていることがわかり、レーザー分光の利点を示すことができた。

スペクトルの線幅の広がりには複数の要因があるが、レーザー分光ではドップラーによる広がりが支配的であるため、プラズマ中のイオン温度を式(1)から求めることが可能である。

$$T_i = \frac{M_i c^2}{8k_B \ln 2} \left( \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right)^2 \quad (1)$$

図7のLIFスペクトルの線幅から温度を求めると 24(5) eV となった。これは予想された値より低いが、その理由としてトラップ領域にある低価数の Ar イオンや酸素、炭素、窒素イオンがトラップ領域から熱とともに出て行くことにより冷却される蒸発冷却だと考察した。

## 3.2 寿命測定

### 3.2.1 TACとMCAによる測定

図9にLIF強度の減衰の様子を示す。横軸はLIF強度のピークを0 nsとしたもの、つまりレーザーが照射された時間を0 nsとしたのちの時間を示している。フィ

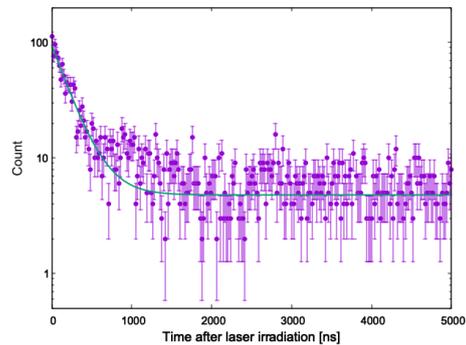


図9 LIF 強度減衰の様子

ッティングに使用した関数は  $f(x) = a \exp(-x/b) + c$  である。フィッティング結果から 223(13) ns と求められた。

### 3.2.2 MCSによる測定

図 10 に結果を示す。フィッティングに使用した関数

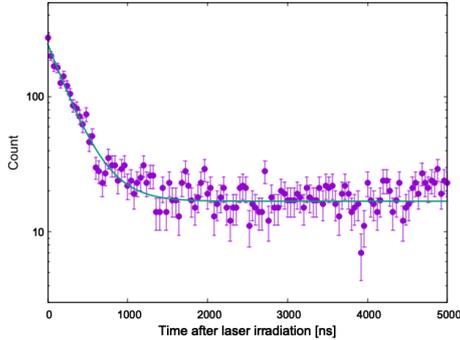


図 10 再実験の LIF 強度減衰の様子

は  $f(x) = a \exp(-x/b) + c$  である。フィッティング結果から 267(10) ns と求められた。

### 3.2.3 実験結果との比較

表 1 に遷移寿命の実験結果と理論計算結果を示す [5, 6, 7, 8, 9]。本実験で求めた寿命はどちらも表 1 の

表 1 遷移寿命の実験結果と理論計算結果

	寿命 [ns]
実験 (MCA+TAC)	223(13)
実験 (MCS)	267(10)
理論計算 (Coulomb Gauge)	323
理論計算 (Babshkin Gauge)	341
P. Jönsson(Coulomb Gauge) [5]	333.7
P. Jönsson(Babshkin Gauge) [5]	350.4
K. M. Aggarwal(GRASP156) [6]	375
K. M. Aggarwal(DFS46) [6]	371.9
Z. K. Huang [7]	343.6
Y. Ralchenko [8]	329
K. T. Cheng [9]	365

全ての理論計算より短い結果となっているため、その原因について考察する。量子力学で原子構造を考える時、原子番号  $Z$  が小さい時に良い近似である LS 結合と  $Z$  が大きい時に良い近似である  $jj$  結合の二つの考え方が存在する。今回測定したのは  $^3P_1 \rightarrow ^1S_0$  という LS 結合においては異重項間の禁制遷移であるため、その寿命には  $^3P_1$  と  $^1P_1$  との混合がどの程度であるか、つまり LS 結合的描像からどの程度ずれているかが重要となる。 $Z = 18$  の Ar の場合、LS 結合から  $jj$  結合へ変化する中間領域であり、 $^3P_1$  と  $^1P_1$  の微妙な混合係数の変化が寿命の値に大きな影響を与える。そのため、正確な理論計算が困難となることが実験と理論計算が合わない理由

の一つとして挙げられる。

## 4 結論

本研究ではプラズマアシストレーザー分光法によって  $\text{Ar}^{14+}$  の  $^3P_2 - ^3P_1$  間遷移波長測定と  $^3P_1$  の寿命測定を行った。さらにその結果からプラズマ中のイオン温度測定も行った。

遷移波長測定はレーザーを使用した能動的な測定方法で求めることができ、求めた波長は文献値と矛盾のない結果であった。また、LIF スペクトルの線幅からイオン温度求めることができた。そのため、本研究手法でそれらを測定できるという技術的に意味のある結果を示すことができた。実験で求めた遷移寿命はどの理論計算結果よりも小さな値で寿命が求められた。その理由を特定するまでには至らなかったが、理論計算でのみ調べられていた寿命を実験で求めることができたという物理的に意味のある結果を得ることができたと考える。

今後の展望として、同様の手法を適用できるような多価イオンに対して実験を行い、これまで実験で求められていなかった寿命の測定を実施できると良いと考える。また研究室が有する高エネルギー EBIT、Tokyo-EBIT で行うことでより高価数のイオンの実験や磁場が大きい時の実験が可能になるため、本研究とは異なる様子が見られると考える。

## 参考文献

- [1] Y. Ralchenko, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section B: Beam Interact. Mater. Atoms **408**, 38–41 (2017) .
- [2] N. Kimura *et al.*, Commun. Phys. **6**, 8 (2023) .
- [3] N. Kimura *et al.*, Phys. Rev. A **107**, 022805 (2023) .
- [4] R. S. Orts *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 103002 (2006) .
- [5] P. Jönsson, C. F. Fischer, E. Träbert, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **31**, 3497 (1998) .
- [6] K. M. Aggarwal, F. P. Keenan, S. Nakazaki, A & A **436**, 1141–1150 (2005) .
- [7] Z. K. Huang *et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser. **235**, 2 (2018) .
- [8] Y. V. Ralchenko, L. A. Vainshtein, Phys. Rev. A **52**, 2449–2452 (1995) .
- [9] K. T. Cheng, Y. K. Kim, J. P. Desclaux, At. Data and Nucl. Data Tables **24**, 111–189 (1979) .