

準安定状態へのポピュレーショントラップの時間発展計測

中村信行研究室 物部将士

1. 序論

1.1. 研究背景

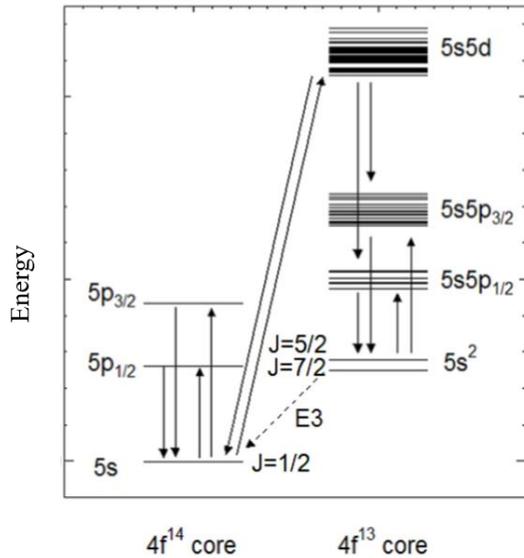


図 1.1.1 プロメチウム様ビスマスイオンのエネルギー準位図[11]

プロメチウム(原子番号 $Z=61$)様重元素イオンの電子配置は、 $4f$ 殻までが閉殻となり $5s$ 電子を 1 個有するアルカリ金属様構造をもつため、最も重要な系統の 1 つとして研究されてきた。1980 年、Curtis と Ellis の理論計算から始まり[1,2]、その後も、ビームフォイル[3-6]、トカマク[7]、電荷交換[8]、電子ビームイオントラップ(Electron Beam Ion Trap : EBIT)[9,10]と様々な方法でアルカリ金属様構造と $5s$ - $5p$ 共鳴線の研究が行われてきたが、解明されなかった。しかし、近年、先行研究により、プラズマ中のプロメチウム様重元素イオンは、平衡状態において基底状態よりも準安定状態のポピュレーションが優勢となり、基底状態を終状態とする $4f^{14}5s$ - $4f^{14}5p$ 遷移が強く現れず、準安定状態

を終状態とする $4f^{13}5s^2$ - $4f^{13}5s5p$ 遷移が強く現れることが明らかとなった[11]。この原因の説明をするために、プロメチウム様ビスマスイオンのエネルギー準位図 1.1.1[11]を使用する。プロメチウム様ビスマスイオンの基底準位は $4f^{14}5s$ である。イオンが基底状態にあったならば、 $4f^{14}5p$ への励起が起きる。その結果、 $4f^{14}5s$ - $4f^{14}5p$ 遷移の発光線が現れ、確認されるはずである。しかし、その一方で、基底準位から $4f^{13}5s5d$ への遷移も起きる。この $4f^{13}5s5d$ へ励起したイオンは最終的に第一励起準位の $4f^{13}5s^2$ へ脱励起する。この準位は数十秒という長寿命である準安定準位ため、基底状態へ戻る事が出来ない。よって、時間とともに基底状態のポピュレーションは低くなり、準安定状態のポピュレーションが優勢となってしまふ。このような現象をポピュレーショントラップと呼ぶ。本研究では基底状態から準安定状態へのポピュレーションの時間発展を時間経過と共に観測することを目的とした。

1.2. 先行研究

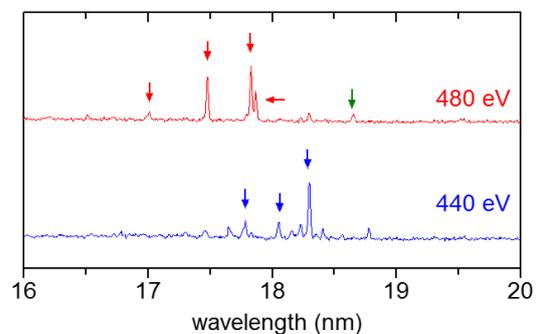


図 1.1.2 EUV 領域の金イオンのスペクトル[12]

図 1.1.2[12]は先行研究による EUV 領域での金イオンのスペクトルである。青色のスペクトルは電子エネルギーを 420eV にしたときのもので、青色の矢印に対応するラインはサマリウム様金イオン(17+)の遷移である。このスペクトルから 440eV ではサマリウム様金イオンが支配的であることがわかる。一方、赤色のスペクトルは電子エネルギーを 480eV にしたときのもので、赤色の矢印と緑色の矢印に対応するラインはプロメチウム様金イオン(18+)の遷移である。このスペクトルから 480eV ではプロメチウム様金イオンが支配的であることがわかる。さらに、赤色の矢印のラインは準安定状態を終状態とする遷移で、緑色の矢印のラインは基底状態を終状態とする遷移である。準安定状態への遷移は優勢であるが、基底状態への遷移はかなり弱いことがわかる。つまり、平衡状態において、準安定準位のポピュレーションが支配的であるといえる。このように、遷移強度を測定することによって、ポピュレーションを研究することが可能である。先行研究では電子エネルギーを固定し、長時間測定を行った。その結果、平衡状態でのポピュレーションを研究したことになる。そこで、本研究では準位間のポピュレーションの時間変化を研究するために、スペクトルの時間発展計測を行った。

2. 実験装置

2.1. 実験装置

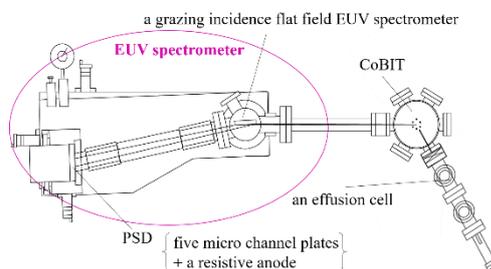


図 2.1.1 実験装置概略図

今回、実験で使用した元素は金で、小型 EBIT(compact EBIT : CoBIT)を使って、プロメチウム様金イオンを生成した。EBIT について簡単に説明する。EBIT は主に電子銃、ドリフトチューブ(Drift Tube : DT)と呼ばれる円筒電極、電子コレクター、ヘルムホルツ型の超伝導コイルの 4 つで構成されている。3 つに分かれた DT の中央の電極の印加電圧を低くすることで、井戸型ポテンシャルが形成され、イオンを軸方向にトラップする。また、超伝導コイルにより、電子ビームが空間電荷ポテンシャルを形成し、イオンを径方向にトラップする。2つのポテンシャルにより、3次元的にトラップされたイオンに電子ビームを入射し逐次電離により多価イオンが生成される。イオン化に寄与しない電子ビームは電子コレクターに回収される。回折格子は平面結像型不等間隔凹面回折格子で、溝本数 1200 本のものを使用した。検出器は 5 枚のマイクロチャネルプレートから成る位置有感検出器(PSD)を使用した。

2.2. 時間発展計測

まず、準備段階として、プロメチウム様金イオンよりも 1 つ下の価数のサマリウム様金

イオン(17+)を生成する。このとき、電子ビームはサマリウム様金イオンのイオン化エネルギーよりも低い 420eV とする。その後、電子ビームエネルギーを 420eV から 500eV にあげることによって、電離させてプロメチウム様金イオン(18+)を生成する。この電子ビームを変えてからの遷移強度を測定する。100ms 後、電子ビームエネルギーを 420eV に戻し、再びサマリウム様金イオンを生成する。サマリウム様金イオンが支配的となり、平衡状態となったことを確認した後、電子ビームエネルギーを 500eV に上げて、観測を再び開始する。このサイクルを繰り返し、データを蓄積させていく。

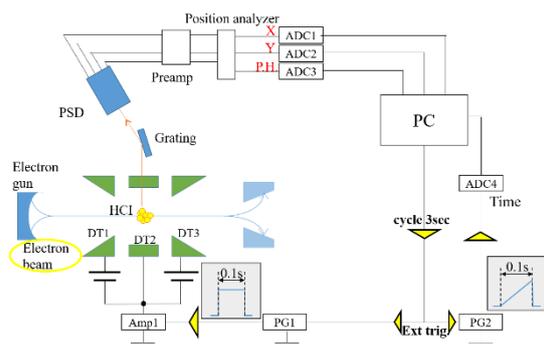


図 2.2.1 時間発展計測の実験システム

図 2.2.1 は時間発展計測の実験システムとなる。まず、EBIT の電子ビームエネルギーは電子銃と DT との電位差によって決まる。本研究では、電子銃の電圧を固定し、PC によって DT の電圧を操作する。PC から周期 3s でパルスが出力し、このパルスによって、パルス発生器 1 と 2 が出力する。パルス発生器 1 の矩形波は増幅され、DT の電圧を上げ、電子ビームエネルギーを制御する。この操作により、電子ビームエネルギーを 420eV と 500eV とで切り替えることができる。この電子ビームエネルギーを上げた

100ms の間のサマリウム様イオンからプロメチウム様金イオンへの電離プラズマを測定する。一方、パルス発生器 2 からは三角波が出力される。この波形の電圧が電子ビームエネルギーを 500eV に切り替えた後の時間に対応する。分光器が EUV 光子を検出した時、時間信号と同時に、PSD 上の位置情報も記録される。

3. 金イオンの時間発展計測結果

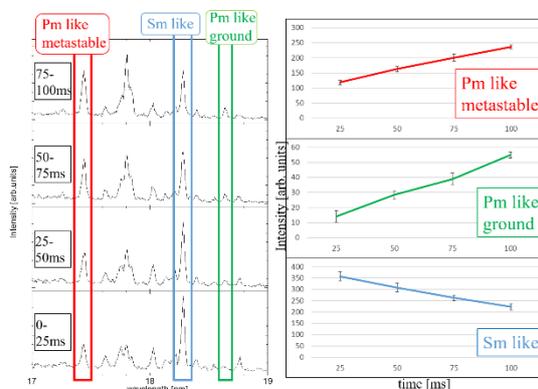


図 3.1 時間分解された金イオンのスペクトルと遷移強度の時間依存性

図 3.1 の左側は時間分解した金イオンのスペクトルである。横軸は波長、縦軸は強度で、下から順番に 25ms ごとにため込まれたデータによるスペクトルが示されている。さらに、右側のグラフは 3 つのラインの時間依存を示したグラフとなる。赤色と緑色のラインはプロメチウム様金イオンの遷移で、青色のラインはサマリウム様金イオンの遷移を示す。サマリウム様金イオンの遷移強度は時間と共に下がり、プロメチウム様金イオンの遷移強度は時間と共に上がっている。これは期待通り、イオンの変化が十分に確認できているといえる。次に、赤色と緑色のラインを比較する。どちらもプロメ

チウム様金イオンの遷移であるが、赤色は準安定状態を終状態とする遷移で、緑色は基底状態を終状態とする遷移である。もし、時間と共に準位間のポピュレーションの変化があるならば、2つのグラフからは異なった時間依存性を示すはずであるが、どちらも同じような時間依存性を示した。

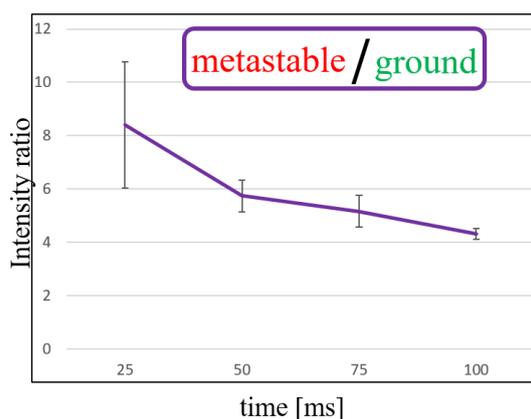


図 3.2 準安定状態を終状態とする遷移と基底状態を終状態とする遷移の強度比の時間依存性

図 3.2 は準安定状態を終状態とする遷移と基底状態を終状態とする遷移との強度比を時間の関数として示している。もし、予想していたような基底状態から準安定状態へのポピュレーションの変化が時間と共に生じていけば、この比は増加傾向となる。しかし、そのような時間依存性は確認できなかった。一見、時間と共に減少しているように見えるが、誤差の大きさを考慮すると、ほとんど一定で、時間依存性が観測できていないという結論に至る。この結果から、基底状態から準安定状態へのポピュレーションの変化の速度は、サマリウム様金イオンからプロメチウム様金イオンへの電離の速度よりもかなり大きいと考えられる。

4. まとめ

サマリウム様金イオンからプロメチウム様イオンへの電離の時間発展は観測できた。しかし、基底状態から準安定状態へのポピュレーションの変化は観測することができなかった。つまり、サマリウム様金イオンからプロメチウム様金イオンへの電離の速度よりも、プロメチウム様金イオンの基底状態から準安定状態へのポピュレーションの変化の速度の方がかなり大きいといえる。

参考文献

- [1] L. J. Curtis and D. G. Ellis, Phys. Rev. Lett. 45, 2099 (1980).
- [2] D. G. Ellis and L. J. Curtis, Nucl. Instrum. Methods 202, 339 (1982).
- [3] B. M. Johnson, K. W. Jones, T. H. Kruse, L. J. Curtis, and D. G. Ellis, Nucl. Instrum. Methods 202, 53 (1982).
- [4] C. E. Theodosiou and V. Raftopoulos, Phys. Rev. A 28, 1186 (1983).
- [5] E. Trabert and P. H. Heckmann, Z. Phys. D 1, 381 (1986).
- [6] V. Kaufman, E. Trabert, P. H. Heckmann, G. Moller, V. Lodwig, and J. H. Blanke, Phys. Scr. 42, 705 (1990).
- [7] K. B. Fournier, M. Finkenthal, S. Lippmann, C. P. Holmes, H. W. Moos, W. H. Goldstein, and A. L. Osterheld, Phys. Rev. A 50, 3727 (1994).
- [8] O. Andersson, A Method for Atomic Spectroscopy of Highly Charged Ions in the Pm Isoelectronic Sequence, Master 's thesis, Lund University, 1995.
- [9] R. Hutton, Y. Zou, J. R. Almandos, C. Biederman, R. Radtke, A. Greier, and R. Neu, Nucl. Instrum. Methods B 205, 114 (2003).
- [10] S. Wu and R. Hutton, Can. J. Phys. 86, 125 (2008).
- [11] Y. Kobayashi, D. Kato, H. A. Sakaue, I. Murakami, and N. Nakamura, Phys. Rev. A 89, 010501(R) (2014).
- [12] Y. Kobayashi, K. Kubota, K. Omote, A. Komatsu, J. Sakoda, M. Minoshima, D. Kato, J. Li, H. A. Sakaue, I. Murakami, and N. Nakamura, Phys. Rev. A 92, 022510(2015)