

電子ビームイオントラップの電子エネルギー制御による 多価イオンの励起・電離過程の研究

中村信行研究室 物部将士

1. 序論

電子ビームイオントラップ(Electron beam ion trap : EBIT)[1]は多価イオンを研究するための装置である。EBITの電子ビームエネルギーを制御することにより、電子と多価イオンとの衝突の中で二電子性再結合[2]や共鳴励起[3]のような重要な原子過程の研究を可能とする。また、電離や再結合が進行する過程や、準位間のポピュレーションの変化も観測することができる。本研究ではこのEBITの電子ビームエネルギー制御を利用して、プロメチウム様金イオンの電離や励起を観測する研究と、鉄14価に着目した共鳴励起過程を観測する研究を行った。

2. 実験装置

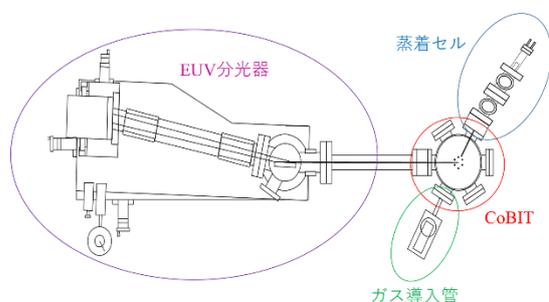


図 2.1 本研究における実験装置概略図

本研究では、電子ビームイオントラップ (electron beam ion trap : EBIT)[1]を用いた。EBITは主に電子銃、3つのドリフトチューブ (drift tube : DT)、コレクター、超伝導コイルによって構成されている。電子銃から放出された電子はカソード電位とアノード電位差によって加速され、超伝導コイルによって径方向に圧縮されながらドリフトチュー

ブに入射される。3つのドリフトチューブ、DT1、DT2、DT3では、DT1とDT3の両端の電極に高い正電圧が印加されて、多価イオンが軸方向にトラップされる。径方向に対する多価イオンの閉じ込めは、超伝導コイルによって高密度に圧縮された電子ビーム自身が作り出す空間電荷ポテンシャルによって達成される。また、閉じ込められたイオンは、電子ビームの逐次衝突を受けて多価イオン化される。さらに、電子はイオン化やトラップの他に、イオンを励起させて光を放出させる役割も担う。本実験では小型電子ビームイオントラップ[4]を使用した。

トラップされたイオンからの極端紫外領域の発光は平面結像型不等間隔凹面回折格子[5]によって観測された。回折格子は溝本数1200 lines/mmの日立テクノロジーズ社001-0659を採用している。回折された光子は位置有感検出器(PSD)によって検出された。本実験で扱ったPSDは、5枚のマイクロチャンネルプレート(MCP)と、空間情報を提供するための抵抗アノードエンコーダ(RAE)によって構成されている。

本研究では、周期的に電子ビームエネルギーを制御するために、カソード電位を固定し、DT2の電位を周期的に変化させている。任意波形生成器から出力された電圧波形を増幅器で増幅し、DTの電位を周期的に変えて、電子ビームエネルギーを変化させている。

3. プロメチウム様金イオンのポピュレーショントラップ解明のための時間発展測定

3.1 序論

近年、小型電子ビームイオントラップによるプロメチウム様ビスマスイオン($Z=83$)の観測と衝突輻射モデル計算によって、 $4f^{13}5s^2$ 準安定状態のポピュレーションは、 $4f^{14}5s$ 基底状態のポピュレーションよりも優勢であり、その結果、共鳴線 $4f^{14}5s-4f^{14}5p$ は、 $4f^{13}5s^2-4f^{13}5s5p$ 遷移に比べてはるかに弱いことが報告された[6]。この準安定状態 $4f^{13}5s^2$ のポピュレーションの方が支配的であることを準安定状態のポピュレーショントラップと呼ぶ。

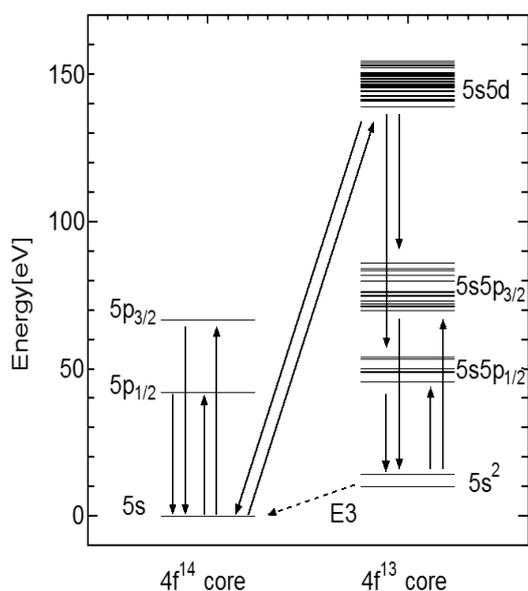


図 3.1 プロメチウム様金イオンのエネルギー準位図

図 3.1 のプロメチウム様金イオンのエネルギー準位図をもとに、ポピュレーショントラップの原因について説明する。基底状態 $4f^{14}5s$ は主に $4f^{14}5p$ か $4f^{13}5s5d$ のどちらかに励起される。 $4f^{14}5p$ の方はすぐに基底状

態に脱励起する。一方、 $4f^{13}5s5d$ は基底状態 $4f^{14}5s$ よりも、多くの微細構造準位をもつ $4f^{13}5s5p$ の方へと脱励起する。 $4f^{13}5s5p$ は最終的に $4f^{13}5s^2$ へと脱励起する。この準位は数十秒の長寿命をもち、準安定状態であるため、一度、電子が $4f^{13}5s5d$ へ励起すると、プロメチウム様金イオンはほとんど基底状態に戻ることはできない。その結果、ポピュレーションが基底状態から準安定状態へ移り、最終的に、平衡状態時には準安定状態 $4f^{13}5s^2$ のポピュレーションが支配的となる。

先行研究[6]では、電子エネルギーを固定して、平衡状態のポピュレーションを研究してきた。今回、私は平衡状態になる前の発光スペクトルの時間発展を観測し、準位ポピュレーションの発展を研究した。

3.2 実験

電子が一つ多い状態、サマリウム様金イオン Au^{17+} を準備段階として生成しておき、素早くプロメチウム様金イオン Au^{18+} を生成することでプロメチウム様金イオン内の基底状態から準安定状態へポピュレーションの変化を確認する。

3.3 結果と考察

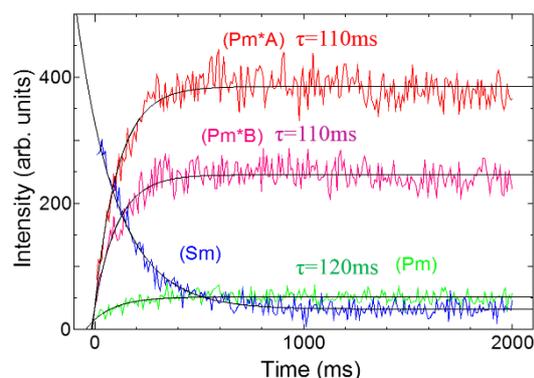


図3.2 金多価イオンの発光強度の時間依存性

図3.2は測定された極端紫外領域の金多

価イオンの発光強度の時間依存性を示している。横軸は、プロメチウム様金イオン生成の閾値以下457eVから、閾値を超えた480eVにエネルギーを変化させた時点をも0msとしたときの時間経過を示す。縦軸は発光強度を示す。(Pm*A)と(Pm*B)はプロメチウム様金イオンの準安定状態への遷移、(Sm)はサマリウム様金イオンの遷移、(Pm)はプロメチウム様金イオンの基底状態への遷移をそれぞれ示している。実験データを指数関数でフィッティングした結果を黒の実線で示している。 τ はそれぞれのライン強度をフィッティングしたときに求められた時定数を示す。また、フィッティングにより求められた関数の切片は0を示していない。これはエネルギーを変えた時点(0ms)で、すでに、プロメチウム様金イオンが存在していることを意味する。

図3.2を見ると、おおよそ0msから200msの間で著しく各ラインの発光強度が変化し、電離的に非平衡状態であると言える。よって、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過程が観測できたといえる。

図3.3は図3.2のプロメチウム様金イオンの基底状態への遷移の発光強度と準安定状態への遷移の発光強度を使って求めた強度比の時間依存性を示している。横軸は図3.2と同様、縦軸は強度比を表している。(Pm*A)/(Pm)、(Pm*B)/(Pm)それぞれ、図3.2のフィッティングの結果を使って計算している。 τ はそれぞれの強度比の時定数を示す。

この図3.3から、初期段階0msからおおよそ200msあたりにおいて、明らかに著しい強度比の変化が確認され、2つの状態間でポピュレーションの変化があったといえる。さ

らに、強度比が増加を示すことから、基底状態から準安定状態へのポピュレーションの変化があったと考えられる。

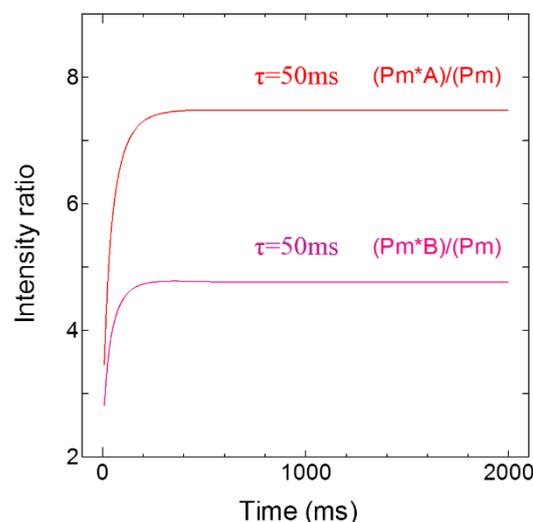


図3.3 Pm様金イオンの基底状態への遷移と準安定状態への遷移の強度比の時間依存性

図3.2のプロメチウム様金イオンの準安定状態への遷移の発光強度を示すグラフ(Pm*A)の時定数は110msである。このグラフ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過程を示すことから、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過程が平衡状態になるまでの時定数を110msと考えることができる。一方、図3.3のプロメチウム様金イオンの準安定状態への遷移の発光強度と基底状態への遷移の発光強度との比を示すグラフ(Pm*A)/(Pm)の時定数は50msである。このグラフは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遷移によるポピュレーションの変化を示すことから、基底状態から準安定状態へのポピュレーションの変化が平衡状態になるまでの時定数を50msと考えることができる。この2つの時定数を比較

することにより、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によるポピュレーションの変化よりも、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遷移によるポピュレーションの変化の方が速いことがわかった。

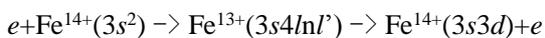
4. 閾値近傍における鉄多価イオンの電子衝突励起過程の研究

4.1 序論

太陽コロナのような天体高温プラズマにとって、共鳴励起過程は極めて重要である。しかし、天体プラズマでは電子がエネルギー分布を有しており、特定のエネルギーのみ起きる共鳴励起過程の研究をすることは難しい。そのため、エネルギーの制御が可能な実験室プラズマでの研究が必要となる。しかし、共鳴励起過程は、ほとんど実験が行われておらず、未だにデータも集まっていない。

近年、小型電子ビームイオントラップを用いて極端紫外線領域における鉄14価の $3s3p-3p3d$ 遷移の電子エネルギー依存性を測定したところ、LMM共鳴励起の観測に成功したとの報告があった[7]。また、この先行研究では、非共鳴励起において実験データと理論計算との間で差異が確認されている。

本研究ではLMMよりも強い共鳴を起こすMNN共鳴励起を観測することを目的とし、先行研究で確認された非共鳴励起においての実験データと理論計算との間の差異を再度検証する。MNN共鳴過程は以下の式で表すことができる。



4.2 実験

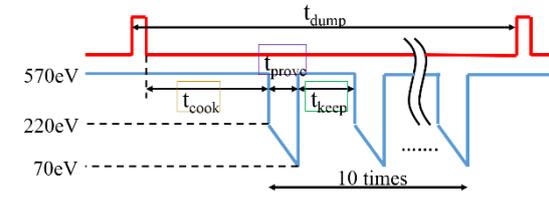


図4.1 共鳴励起観測のための電子ビームエネルギーの時間変化

図4.1 は本実験における電子ビームエネルギーの時間変化を示している。 t_{dump} はイオンの払い出しを行う周期であり、1800msに設定した。 t_{cook} は鉄14価を生成する時間であり、1600msに設定した。イオンの払い出しによってトラップ内のイオンが吐き出されてしまうので、イオンの払い出しの後に必ず t_{cook} の鉄14価を生成する時間が必要となる。 t_{cook} の鉄14価を生成する時のエネルギーは570eVとした。 t_{prove} は共鳴励起過程を観測するために、220eV~70eVの間で掃引する時間であり、6msに設定した。 t_{keep} は t_{prove} の間に生じる価数分布の変動を整える役割の時間であり、14msに設定した。今回、特に強い共鳴強度を示すと期待されているのが約90eVであるので、空間電荷ポテンシャルによる電子ビームエネルギーの減少を考慮して、220eV~70eVとした。

4.3 結果と考察

図4.2の黒の実線が実験により求められた $3s3p-3s3d$ 遷移の発光強度のエネルギー依存性を示し、(b)が鉄14価 $3s3p-3s3d(^3P_2-^3D_3)$ 遷移であり、(c)が鉄14価 $3s3p-3s3d(^1P_1-^1D_2)$ 遷移である。赤の実線が理論計算により求められた基底状態($3s^2$)から $3s3d$ への励起を考慮した、 $3s3p-3s3d$ 遷移の発光断面積を示している。横軸は電子

エネルギー(210eV~60eV)を示す。左軸は光子カウント数を示し、右軸は励起断面積を示している。

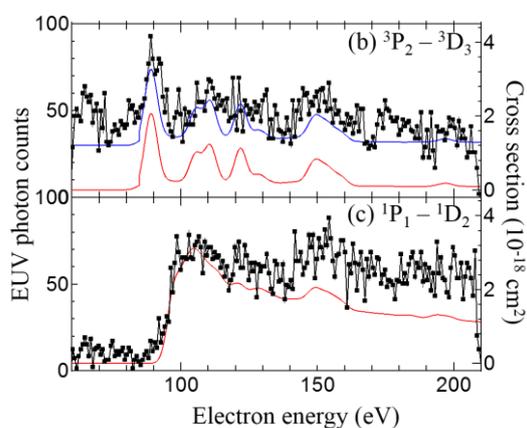


図 4.2 鉄 14 価 $3s3p-3s3d$ 遷移((b) $(^3P_2-^3D_3)$, (c) $(^1P_1-^1D_2)$)の発光強度の電子エネルギー依存性

横軸の電子エネルギーのスケールについて説明する。図 4.2 の (c) 鉄 14 価 $3s3p-3s3d(^1P_1-^1D_2)$ 遷移に注目すると、95eV 以下で励起が起きていないことがわかる。これは基底状態($3s^2$)から励起状態($3s3d\ ^1D_2$)への励起閾値が 94.5eV [8] であるため、電子エネルギーが 94.5eV 以下になると励起できなくなってしまい、その結果、 $3s3p-3s3d$

$(^1P_1-^1D_2)$ の遷移もできなくなってしまったために起きている。この現象を利用し、この 94.5eV 閾値付近のふるまいが、実験結果の (c) 鉄 14 価 $3s3p-3s3d(^1P_1-^1D_2)$ 遷移の発光強度と、理論計算により求められた発光断面積とで一致するように横軸をスケールした。また、縦軸もこの 94.5eV 閾値付近のふるまいが、実験結果の発光強度と理論計算の断面積とで一致するようにスケールしている。

(b) 鉄 14 価 $3s3p-3s3d(^3P_2-^3D_3)$ 遷移も (c) 鉄

14 価 $3s3p-3s3d(^1P_1-^1D_2)$ 遷移と同様のスケールリングを横軸と縦軸に施した。(b) の実験結果の発光強度と理論計算の断面積を比較すると、明らかな不一致が確認された。おそらく、準安定状態($3s3p\ ^3P_2$)を経由した間接励起の寄与をこの理論計算は含んでいないことが要因として挙げられる。青の実線は実験データと一致するように、赤の実線の理論計算によって求めた断面積を底上げした断面積となる。350eV~500eV の LMM 共鳴励起過程を定量的に評価した先行研究でも、(b) 鉄 14 価 $3s3p-3s3d(^3P_2-^3D_3)$ 遷移の理論計算による非共鳴励起断面積の値が実験値と異なっていたという報告をしている [7]。よって、非共鳴励起断面積計算の改善の必要性を再度証明することができた。

共鳴励起断面積に注目すると、実験データの発光強度と理論計算の断面積は、大まかには良い一致を示しているが、完全に一致しているとは言えない。これは理論計算に考慮されていない共鳴励起過程があるのではないかと考えている。図 4.2 (c) の実験データを見ると、140eV~210eV の領域では共鳴による発光強度が理論計算よりも大きいことが確認できる。これは 1 つの共鳴励起によるものではなく、無数の共鳴が存在し、その共鳴励起の重なりで形成されていると考えられる。低エネルギー領域の MNN、MNO、さらに、MNP の共鳴励起過程は多くの中間状態を持ち、1 つ 1 つは弱い共鳴強度であるのがほとんどだが、無数に存在し、共鳴に寄与している。特に、200eV あたりは計算に考慮されていない MNP の共鳴励起が現れる (188.9eV 中間状態 $3s4f6g$ と 183.0eV 中間状態 $3s4f6d$ の共鳴励起が特に強い寄与をもつ) エネルギー領域であることから、MNP 共鳴励

起過程の考慮により実験データとの一致に近づくのではないかと考えている。

また、今回は(c)鉄14価 $3s3p-3s3d(^1P_1-^1D_2)$ 遷移の94.5eVの閾値近傍のふるまいを基準としたが、この94.5eVの閾値近傍のふるまい自体に、実験データの発光強度と理論計算の断面積とを完全に一致させない要因をもつ可能性もありうる。

(b)鉄14価 $3s3p-3s3d(^3P_2-^3D_3)$ 遷移の基底状態($3s^2$)から励起状態($3s3d\ ^3D_3$)への励起閾値は84.5eV[8]であるが、(b)の遷移は閾値以下に電子ビームエネルギーが下がってもある一定の光子カウント数を保つ。これは基底状態($3s^2$)からの励起だけでなく、準安定状態($3s3p\ ^3P_2$)からの励起が寄与している可能性があるためである。準安定状態($3s3p\ ^3P_2$)から励起状態($3s3d\ ^3D_3$)への励起閾値は53.0eVであるので、理論的にはありえる。さらに、もし、準安定状態($3s3p\ ^3P_2$)からの間接励起が寄与している可能性が考えられるならば、この準安定状態($3s3p\ ^3P_2$)から励起状態($3s3d\ ^3D_3$)への共鳴励起の寄与も十分に考えられる。

5. 結論

5.1 プロメチウム様金イオンのポピュレーショントラップ解明のための時間発展計測

プロメチウム様金イオンの準安定状態への遷移とプロメチウム様金イオンの基底状態への遷移の発光強度比の時間依存性を調べた。基底状態への遷移の発光強度に対して、準安定状態への遷移の発光強度が急激に増加していったことから、基底状態から準安定状態への遷移によるポピュレーションの変化があることを確認できた。また、

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変化と、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遷移の変化を時定数によって比較した。その結果、プロメチウム様金イオンへの電離による価数の変化よりも、基底状態から準安定状態への遷移によるポピュレーションの変化の方が速いことがわかった。

5.2 閾値近傍における鉄多価イオンの電子衝突励起過程の研究

電子エネルギー60eV~210eVにおいて、鉄14価の $3p-3d$ 遷移でMNN共鳴励起過程を観測することができた。また、鉄14価 $3s3p-3s3d(^3P_2-^3D_3)$ 遷移において、理論計算による非共鳴励起断面積の値が実験の値と明らかに異なっていることがわかり、非共鳴励起断面積における理論計算の見直しの必要性があると考えられる。また、共鳴断面積においても、実験データと理論計算とで違いがあったことから、理論計算において、MNN共鳴励起、MNO共鳴励起だけではなく、MNP共鳴励起などの高準位を中間状態にもつ共鳴励起を考慮する、もしくは、基底状態からの共鳴励起だけではなく、準安定状態からの共鳴励起も考慮する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] R. E. Marrs et al, Phys. Rev. Lett. 60, 1715 (1988).
- [2] N. Nakamura et al, J. Phys.: Conf. Ser. 58, 267 (2007).
- [3] P. Beiersdorfer et al, Phys. Rev. Lett. 65, 1995 (1990).
- [4] Nakamura, N. et al, 2008, Rev. Sci. Instrum., 79, 063104.
- [5] Ohashi, H. et al, Rev. Sci. Instrum., 82, 083103.
- [6] Y. Kobayashi et al, Phys. Rev. A 89 (2014) 010501(R).
- [7] T. Tsuda et al, Nucl. Instrum. Methods phys. Res. B (2017).
- [8] A. Kramida et al, NIST Atomic Spectra Database (ver. 5. 6. 1), [Online].