

論文審査の結果の要旨

氏名 森下 雄一郎

本論文は5章からなり、第1章は序であり、多価イオンについての解説と本研究の背景および動機について述べられている。第2章には実験の詳細について述べられている。第3章では可視光領域におけるスペクトルの同定と解釈が行われ、第4章では、その結果から、多価イオンの初期分布についての考察が述べられている。最後の第5章はまとめの章である。

多価イオンはそのまわりに強い電場を作るため、金属表面に近づくと電子を捕獲する。この際、電子は高い励起状態に捕獲され、低い励起状態は空のままの原子(イオン)が形成される。このような通常には存在しない原子(イオン)は中空原子と呼ばれている。

通常、中空原子は固体電子のフェルミ速度に比べ低速な多価イオンを平板状の表面にほぼ平行に入射することで作られる。しかしこの手法では、入射イオンは表面上に誘起される鏡像電荷により表面に向かって加速されるため、中空原子は $10^{-13} - 10^{-14}$ 秒程度のごく短時間に固体に突入する。従って、それより遅い遷移は原理的に観測不可能である。

論文申請者は、細い貫通孔(~ 100 nm)を無数にもつフォイル(~ 1 μ m)を標的とすることにより、孤立した中空原子の遷移を可視光領域で観測するという新しい方法を開発した。貫通孔に平行に入射された多価イオンの一部は、出口付近で表面に接近し、表面との距離に応じた数の電子を捕獲し真空中に出射する。この過程によって様々な形成段階にある中空原子が真空中に脱出し、固有の寿命で脱励起する。これに対して可視域での分光測定を行うことで、初期段階の過程を調べる事ができる。(可視域の遷移レートは概ね 10^9 sec $^{-1}$ であり、平板標的では観測できない)。

まず、価数($6 \leq Q_{in} \leq 10$)のAr $^{Q_{in}+}$ イオンを2.0 keV/amuでマイクロキャピラリーに入射したところ、すべての入射イオンで入射価数に固有な線スペクトルが観測された。これを、イオンのエネルギーレベルが水素様であると仮定して解析し、遷移の始状態の主量子数(n_i)が $Q_{in} \leq n_i \leq Q_{in} + 3$ に分布しており、どの入射価数にお

いても強度は $n_i = Q_{in}$ で最大で、 $n_i = Q_{in} + 3$ に向かって単調に小さくなり Q_{in} でスケールされていることを明らかにした。

また、ひとつの入射価数で測定されたスペクトル線が、それより高価数のスペクトルでも観測されることを見だし、これは、キャピラリー内で入射イオンが複数個の電子を捕獲し、高励起状態に1つ電子を残したまま、他の電子がカスケードしてコアの空孔を埋める過程があることを示していると解釈した。

次に、 $Q_{in} = 7, 8$ の場合に対して、遷移の始状態の角運動量子数 (l_i) を高分解能の測定によって調べた。コアがエネルギー的に安定な閉殻になっている $Q_{in} = 8$ ($2p^6nl_i^1$) のスペクトルでは、構造が単純であったが、これは、捕獲された電子の電場によるコアの分極を考慮した半経験的公式により、 $4 \leq l_i \leq n_i - 1$ の状態からの遷移であることを明らかにした。一方、 $Q_{in} = 7$ ($3s^1nl_i^1$) のスペクトルは $Q_{in} = 8$ に比べ複雑な構造であり、分極公式では同定できなかった。これに対して論文申請者は、観測された遷移に関わる状態 ($3s^1nl_i^1; n = 7 - 10$) のエネルギーが、 $3p5l_i'$ のエネルギーとほぼ等しいことから生じる配置間相互作用のためであると解釈した。そこで、 $3l3l' + 3snl (n = 4 - 11) + 3pnl (n = 4 - 6) + 3dnl (n = 4 - 5)$ の電子配置を考慮した Multi-configurational Hartree-Fock 法により遷移エネルギーを計算を行った。計算で得られた波長は計測された波長と $\sim 1\%$ 程度のずれがあったが、1) 各 l_i 遷移の相対的位置関係、2) $l \cdot s$ 相互作用による l_i 遷移の分裂幅、3) $Q_{in} = 6$ スペクトルとの比較、により、合理的に遷移の l_i を $5 \leq l_i \leq n_i - 1$ と同定できた。

さらに、キャピラリーの出口での移行電子の (n, l) の初期分布を求めるために、同定された遷移の強度をレート方程式を使って解析した。その結果、分布の強度及び n に関する分布の幅は2つの入射価数 $Q_{in} = 7, 8$ でほぼ同じで $\delta n \sim 2$ であるが、分布全体が n の大きな方向に約1シフトすることが分かった。分布の n に関する平均値は $8.5 (Q_{in} = 7)$ 、ないし $9.5 (Q_{in} = 8)$ であり、それらは Classical Over Barrier (COB) model の予言

$$n_c(Q_{in}) \sim \frac{Q_{in}}{\sqrt{2W}} \left(\frac{1}{1 + \frac{Q_{in}-0.5}{\sqrt{8Q_{in}}}} \right)^{1/2} \sim Q_{in} + 1 \quad (W: \text{仕事関数})$$

と非常に良く一致した。遷移の始状態を Q_{in} で分類するスペクトル線の強度の変化が各入射価数でスケールする事をこれから説明した。また、 (n, l) の初期分布を、イオンの速度を変えて測定されたデータからも見積もり、速度依存性がないことを示した。これはイオン自身の鏡像電荷から生じる電場 ($F = \frac{W^2}{8}$) による Stark 効果で、表面上空に形成されるイオンの固有状態が、異なる l の固有状態の重ねあわせになっているた

めであると考えられる。さらに電場の強さは $n = Q_{in} + 1$ と $n = Q_{in} + 2$ の固有状態をも混合させるのに十分である事も明らかにした。

このように、論文提出者はマイクロキャピラリーに入射した多価イオンを可視光領域で分光するという新しい方法を開発し、それを用いて得られたデータを合理的に解釈して、ミクロのレベルで生じている現象を明らかにした。

なお本論文第2-4章は小牧研一郎氏等との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析および検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。