

【学位論文審査の要旨】

1 研究の目的

中性原子から多数の電子を剥ぎ取ることによって生成する多価イオンは、1869年に皆既日食の際に太陽コロナからの未知の輝線スペクトルとして初めて観測され、1930年代になってやっと13価のFeイオンによることが判明してから、分光学的な研究が進展した。それ以降、多価イオンと中性原子・分子の衝突過程も、基礎的な原子分子物理学の対象として、長年に亘って実験と理論の両方からのアプローチによって詳細に研究されてきた。特に、比較的小型の多価イオン源が開発されて、小さな実験室でも多価イオンが生成できるようになってから、多くの研究機関で活発に実験が行われるようになった。特に、核融合プラズマ中における不純物多価イオンはプラズマ診断の観点からも重要であると同時に、電荷交換反応で生成した励起状態からの輻射がプラズマ温度を下げってしまうという問題があるため、プラズマ物理の基礎データとして1970年代から研究が進められてきた。また、1990年代に太陽風に含まれる多価イオンが中性物質と衝突して軟X線を放出する過程が、全天における背景輻射や彗星からの発光としてX線観測衛星によって発見された。さらに、超新星残骸や惑星状星雲など様々な領域からも、多価イオンの電荷交換反応に起因すると考えられるX線が観測されており、宇宙を研究する手段としても注目されている。

衝突実験の多くは、電子基底状態にあるイオンを用いて行われてきたが、ごくわずかではあるが長い寿命を持つ準安定励起状態のイオンを用いた実験も報告されている。 $1s2s\ ^3S_1$ の電子状態にある中性He原子は、それより低いエネルギーには基底状態 $1s^2\ ^1S_0$ しか存在せず、軌道角運動量とスピン角運動量の両方の選択則において禁制な磁気双極子遷移となるために、寿命が7862 sにもなることが知られている。同じ電子配置をもつHe様イオンも準安定状態であり、 C^{4+} は20.6 ms、 O^{6+} は0.96 msという長い寿命を持っている。宇宙空間で太陽風イオンから準安定状態が生成した場合、太陽風が数100 km/sの速度を持つので1 msの発光寿命の間には1 km以上も飛行することになる。この距離は宇宙では空間分解能以下の点に過ぎないが、地上実験を考えると非現実的なサイズである。そのため、地上での再現実験を行うには、発光するイオンを長時間狭い領域に閉じ込めておく必要がある。また、これらの準安定励起状態にあるイオンが太陽風程度の速度で中性原子・分子と衝突すると、電子が多価イオン側に移動することによって1s軌道に空孔を持ったまま内殻励起状態が生成する可能性がある。この高励起状態に関してはAuger遷移によって放出される電子を観測することで実験的に研究されていたが、その理解は充分ではなく、特に電子放出と競争的に光を出して脱励起する過程についての報告は極めて限られていた。

本研究では、He様多価イオンの準安定励起状態が生成する過程と、その状態が起こす衝突過程の2種類の素過程について、軟X線領域から極端紫外線領域における分光学的な測定を行った。

2 研究の方法と結果

電子サイクロトロン共鳴型多価イオン源において、電子温度が約 10^6 K のプラズマを形成し、中性ガスから多価イオンを生成した。15 kV 以下の電位差によって引き出したイオンビームを磁場によって価数選別した後に、気体標的が満たされたセルを内蔵した衝突用真空槽に導いた。

太陽風と同程度の速度に加速した H 様の O^{7+} をセルに満たした希薄な He 気体と衝突させ、一電子捕獲によって生成した O^{6+} をビームライン後段に設置した Kingdon 型のイオントラップに導いた。この O^{6+} は基底状態 $1s^2\ ^1S_0$ と準安定励起状態 $1s2s\ ^3S_1$ の混合物であり、イオントラップの中心に張られたワイヤーの周りにイオンを周回させて蓄積している間に軟 X 線を放出するため、そのスペクトルをシリコンドリフト型の半導体検出器によって観測した。半導体検出器のエネルギー分解能は 70 eV 程度であるが、観測されたスペクトルは明らかに $1s^2\ ^1S_0 - 1s2s\ ^3S_1$ の禁制遷移 (561.5 eV) に対応する一つのピークだけから成っており、 O^{7+} と He の衝突領域からの発光として同じ半導体検出器によって観測された許容遷移 ($1s^2\ ^1S_0 - 1snp\ ^1P, n = 2-4$) の発光スペクトルと比較すると、ピークのエネルギーが 10 eV ほど低く、その上 $n = 3-4$ に対応する高エネルギー成分が観測されなかった。従って、太陽風速度を持った O^{7+} の電荷交換反応によって生成された準安定励起状態からの禁制遷移を実験室で初めて観測することに成功したと言える。

電子サイクロトロン共鳴型多価イオン源によって生成された C, N, O の He 様イオンには数%程度の準安定励起状態が含まれていることが知られている。そこで価数選別器によって入射イオンとして He 様イオンを選んで、様々な種類の気体を満たした衝突セルからの発光を、平面結像型斜入射分光器によって分散させ、電子冷却式 CCD カメラによって観測した。古典的オーバーバリアモデルによれば、多価イオンの電荷交換反応によって生成する励起状態の主量子数は多価イオンの価数と標的気体のイオン化ポテンシャルだけに依存する。そこで、5 種類の希ガス以外に Ar, Kr, Xe と類似したイオン化ポテンシャルを持った N_2 , CO_2 , O_2 を標的として使用した。何れの入射イオンについても、主な発光は一電子捕獲によって生成した Li 様イオンの $1s2s2p$ および $1s2s3p$ 状態から $1s^22s$ 状態への遷移に対応するものと考えられたが、内殻励起 Li 様イオンに関する信頼できる分光学データが乏しかったため、Cowan コードを用いて遷移波長および遷移速度の計算を行った。Cowan コードは非相対論的な原子計算コードであるが、C, N, O は軽元素でありスピン軌道相互作用を含む相対論的効果は小さいことから、十分に信頼できる計算結果が得られると考えられる。実測スペクトルと計算結果の詳細な比較によって、 C^{3+} では $1s2p3p$, $1s2s4d$, $1s2p3d$, N^{4+} では $1s2s4p$, O^{5+} では $1s2p3p$, $1s2p3d$, $1s2p2p$, などのように一電子捕獲 (single electron capture) だけではなく、電子捕獲と同時に入射多価イオンが励起される移行励起 (transfer excitation) によって生成した励起状態からの発光も観測されていることが判った。これらの計算結果は既に報告されていた理論計算とも良く一致しており、計算精度については一定の信頼が持てる。また、計算の結果、 $1s^23s - 1s2s4p$ のように二つの電子が同時に遷移することで一つの光子が放出される二電子一光子遷移 (two-electron one-photon

transition, TEOP) が起きていることも明らかになった。さらには、イオン化ポテンシャルが類似している標的气体であってもスペクトルには顕著な違いが観測され、特に Xe と O₂ でその違いが大きかった。詳細な理由は不明であるが、Ar, Kr, Xe の順に標的が重くなるほど軽原子で構成されている分子標的との違いが大きくなることから、原因としては重元素のスピン軌道相互作用が候補として挙げられる。

3 審査の結果

準安定励起状態からの禁制線発光の観測は、様々なイオントラップによって既に行われているが、太陽風と同程度の衝突速度での電荷交換反応によって生成された He 様イオンからの禁制線の観測という意味では本研究が初めてである。測定に用いたイオントラップの開発も著者本人によるものであり、最初のアイデアこそ指導教員の思い付きであったが、それを形のあるものとして実現したのは、ひとえに著者の努力の賜物であり、実験技術の開発の部分も含めて、高く評価できる研究成果である。

準安定励起状態にある多価イオンの電荷交換反応の研究は、1980 年代にグルノーブル(フランス)において少しだけ行われていたが、波長分解能と S/N を向上させ、多様な標的依存性を詳しく調べた例は皆無である。過去の報告と一致する部分もあったが、観測されないとされた衝突系であっても十分な強度のスペクトルが得られるなど、過去の報告には実験的な問題があった可能性も考えられる。それ以外にも、以前の結果では分離されていない強度の弱いピークを確実なものとして検出しており、さらに Cowan コードによって遷移の詳細な同定まで自ら行っている点は評価に値する。しかも、観測例の少ない二電子一光子放出過程を発見したことも非常に意義深い。He 様の準安定励起状態は H 様イオンの一電子捕獲衝突によって生成するが、気体密度の高い惑星大気であれば、脱励起する前に再度気体と衝突することで内殻励起 Li 様イオンが生成し、本研究で同定された遷移が観測される可能性がある。これは太陽風をプローブとした惑星大気の新しい診断方法になり得る。従って、本研究が X 線宇宙物理学に貢献する可能性は高く、大きな波及効果が期待される。また、本研究で用いた Cowan コードによる計算手法は University College Dublin, Ireland に 3 ヶ月ほど留学した際に修得したものであり、海外との共同研究を充分に行うことができるといって研究能力の高さの一端を示しているとも言える。以上により、本研究は博士(理学)の学位に充分値するものと判定した。

4 最終試験の結果

本学の学位規定に従って、最終試験を行った。公開の席上で論文内容の発表を行い、物理学専攻教員による質疑応答を行った。また、論文審査委員による本論文および関連分野の試問を行った。これらの結果を総合的に審査した結果、合格と判定した。