

氏 名 木 村 恭 之  
 学位(専攻分野) 博 士 (工 学)  
 学位記番号 工 博 第 1749 号  
 学位授与の日付 平 成 10 年 5 月 25 日  
 学位授与の要件 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当  
 研究科・専攻 工 学 研 究 科 物 理 工 学 専 攻  
 学位論文題目 フォイル透過原子・イオンの励起状態の研究

(主査)

論文調査委員 教授 藤本 孝 教授 万波通彦 教授 今西信嗣

## 論 文 内 容 の 要 旨

加速器より引き出された高速イオン(原子, 分子)ビームが炭素フォイルを透過すると励起状態イオン, 原子が生成される。これら励起イオン, 原子からの発光を分光計測することによりそれら励起種の性質, たとえば自然寿命, を調べるといふビームフォイル分光法は広く行われている。しかしながら, フォイルによるイオン, 原子の励起機構がまだ明らかでなく, それに関連してこの方法の信頼度自体にも疑問が投げかけられていた。本論文は, この励起の詳細を解明することを目標として申請者が行った研究をまとめたもので, 全8章から成っている。

第1章の序章に続き, 第2章では本研究で用いたイオン・ビーム加速器について, 第3章ではフォイルによって生成された励起原子アンサンブルを密度行列演算子によって記述する方法について述べている。

第4章では, 原子発光線の偏光度がフォイルを照射するビーム電流密度に依存する, という従来からの定説にたいして疑問を呈し, 水素原子発光線と中性ヘリウム原子発光線に対し注意深い偏光実験を行った。どちらの原子種ともに発光線の偏光度はビーム照射開始後, ビーム電流密度に依存しながらもビームドーズの増大とともに変化すること, その変化がある時定数(「ドーズ定数」)を持つ単純な関数によってよく記述されること, さらにビーム照射途中にビーム電流密度を変化させると偏光度も時定数を持ってそれに追従して変化すること, などを見いだした。それらから1. ビーム照射によってフォイルの性質がビーム電流密度に依存して徐々に変化する, 2. ビームによるフォイルの帯電によって生ずる弱い静電場(10V/cm程度)が原子状態にシュタルク効果をおよぼす, という2つの仮定から実験結果すべてを矛盾なく説明できることを示した。

第5章では, 水素原子ライマン $\alpha$ 線(波長121.4nm)にたいする偏光素子の開発について述べている。微弱な発光を効率よく偏光観測するために, 熔融石英製の平面鏡2枚と金のトロイダル鏡を組み合わせ, それらを光軸を軸として回転することにより直交する2つの直線偏光成分を分離して観測するための装置を設計, 製作, 試験した。

第6章では, プロトンビームがフォイルを透過した結果生ずる第1励起状態水素原子を対象として, そのアンサンブルが持つ性質, すなわちポピュレーション, アラインメント, コヒーレンス, を単一の実験で決定したことについて述べている。フォイル下流の限られた領域にビーム方向に電場を印加し, さらに下流の広い領域からの発光を第5章で述べた偏光器を用いて偏光観測した。フォイル励起された原子は電場中を走行する間にシュタルク効果による波動関数混合の作用を受け, その結果として発光線の強度や偏光度が電場の符号や大きさに依存して変化する「電場依存量子ビート」が観測された。一方, 原子の各固有状態それぞれにたいして, 断熱近似のもとに電場依存量子ビート(基本強度)を計算し, 各波動関数の振幅, 相互の位相を調節してそれらを組み合わせて実験結果にフィットすることにより, フォイル透過直後の原子アンサンブルの状態を決定した。その結果, 電子の密度は原子核の前方に張り出し, 確率密度の流れは後方を向いていることが示された。この結論自体は従来からの定説と大きくは異ならないが, 本実験の意義は, 原子アンサンブルについて波動関数の振幅, 相互位相のすべてを単一の実験で決定する方法を提案し, それによって曖昧さのない結論を導いたことである。

第7章ではフォイル励起によって生成された高い電離段階にあるネオンやアルゴンイオンについて, 発光線を同定し, 高

い励起状態のエネルギー準位を確定したことを述べている。0.5～2 MeV/amuのエネルギーでフォイルを透過したイオンは少数の電子しか残らない高電離イオンとなり、可視・紫外分光器によってこれらイオンを観測して高い励起状態からの多数の発光線を得た。発光光子の進行方向によってドップラー効果が異なるために分光器の焦点面が移動する、という効果を補正してスペクトルを観測し、発光線の波長を決定した。イオンにたいする相対論的1電子近似、その多電子近似である polarization formula, さらに配置間相互作用を取り入れた相対論的ハートレー交換近似にもとづいて原子状態の計算を行った。水素様からベリリウム様のネオンについてはすべての計算にもとづいて同定を試み、リチウム様以上のイオンではすべての発光線について、ベリリウム様イオンについては部分的に、同定に成功した。ヘリウム様からナトリウム様のアルゴンでは polarization formula でほとんどの発光線の同定が可能であった。

第8章ではこの分野における研究の流れのなかで本研究が占める位置とその意義を述べている。

## 論文審査の結果の要旨

炭素薄膜を透過する高速のイオン・原子はそこで電離、励起、荷電交換される。こうして生成された励起状態原子・イオンからの発光を観測するビームフォイル分光法は広く行われているが、その励起の詳細についてはいまだ明らかでない。本研究はフォイル励起された水素、ヘリウム原子を対象に、フォイルとイオンの相互作用について解明することを目標として行われたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1 励起原子の異方性、すなわち発光の偏光特性、がイオン・ビームの電流密度に依存することが指摘されてきたが、その統一的な説明はなかった。申請者は注意深い実験により、フォイルにたいするビーム照射量の蓄積とともに偏光特性が変化することを見いだした。このドーズ蓄積効果と、フォイルの帯電による弱い電場（ビーム電流に比例する）の形成という2つの仮定によって実験結果が矛盾なく説明されることを示した。また、ドーズ蓄積効果はビーム電流密度に依存することも見いだした。

2 フォイルにより励起された原子・イオンが励起直後に持つ特性、すなわちそれを表現するポピュレーション、アラインメント、コヒーレンスについて、いままでは単一の測定からそのすべてを決定した例はなかった。本研究では、水素原子第1励起状態を対象とし、フォイル直後の限られた領域に電場を印加することにより励起状態をシュタルク効果によってコントロールし、申請者が開発した極紫外偏光器を用いてその下流域における発光を偏光観測する、という方法により、電場強度に依存した強度測定を行った。その結果、励起状態を特徴づける上記パラメーターすべてを精度よく決定することに成功した。

以上要するに本論文は、従来明らかでなかった実験法上の疑問に明快な解答を与えるとともに、励起原子状態の特性を精度よく決定する斬新な方法を提案したものであり、学術上、実際に寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成10年2月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。