

論文の内容の要旨

論文題目	Li原子-Ca ⁺ イオン混合系における原子-イオン間非弾性散乱の研究
学 位 申 請 者	齋藤 了一

レーザー冷却技術は絶対零度近傍の中性原子集団およびイオントラップ装置によって捕獲された原子イオンの生成を可能した。一方で冷却中性原子と冷却イオンは同じような実験技術を背景としながらも両者を同一の実験装置内で捕獲し、相互作用あるいは結合させる実験は長らく試みられてこなかった。近年、冷却中性原子集団とイオントラップ中の冷却イオンを一つの実験系で捕獲し、両者の相互作用に注目した研究が発表されるようになった。こうした系を原子-イオン混合系と呼んでおり、原子-イオン間が引き起こす散乱現象を利用して極低温における化学反応の研究や固体のシミュレーションといった展開に期待が持たれている。

冷却原子-イオン混合系の特徴として原子およびイオンの量子状態を実験者が任意に選択可能であることがあげられる。通常、常温での原子-イオン間散乱を想定した時、様々な始状態が分布しており、得られる終状態も個々の状態同士の散乱の結果生じた終状態が混ざり合っている。すなわち散乱現象ひいては化学反応過程の根本的な理解にはそれぞれの状態を選別することが重要と言える。その点、レーザー冷却により絶対零度近傍まで冷却された原子あるいはイオンの状態はレーザー光によって精密に制御することが可能である。本研究では、リチウム原子とカルシウムイオンからなる原子-イオン混合系を構築し、両者の状態を制御した際の非弾性散乱に関する研究を行った。こうした実験および実験技術の確立は散乱過程の理解といった興味はもちろん、化学反応過程の量子的制御といった研究における第一歩と言える。

実験系は既存の実験技術を組み合わせることで構築した。高周波を用いて荷電粒子を捕獲するリニアパウルトラップによって光イオン化したカルシウムイオン (⁴⁰Ca⁺) を捕獲し、ドップラー冷却によって絶対零度近傍まで冷却した。一方のリチウム原子 (⁶Li) はリチウムの固体を熱して熱原子線を生成し、ゼーマン減速器を経て磁気光学トラップにて冷却および捕獲を行った。その後リチウム原子を光トラップに移行し、カルシウムイオンと相互作用させるために光ピンセツ

ト技術を用いて冷却された原子集団を捕獲したイオンまで輸送した。混合された原子とイオンの散乱前後の状態の変化からどのような散乱過程が起きたかを検出することができる。本研究においては冷却光の散乱光を観測することで行った。

本研究では、数ある原子-イオン間非弾性散乱の中で特に電荷交換散乱に着目した。この過程はリチウム原子に束縛された電子がカルシウムイオンに飛び移る現象であり、化学反応素過程の一つである。電荷交換散乱の詳細を検証するために散乱断面積のエネルギー依存性とカルシウムイオンの内部状態依存性を測定した。さらに原子-イオン間の散乱エネルギーを制御するためにイオンの運動エネルギーを制御する手法を開発した。イオントラップ中のイオンの運動は永年運動とマイクロモーションに分離できる。永年運動はレーザー冷却によって冷却することができるが、マイクロモーションはイオントラップに用いた高周波によって直接駆動されている運動でレーザー冷却することができない。通常マイクロモーションは最小になるように高周波電場の鞍点でイオンを捕獲するが、外部電場に加えて捕獲点と鞍点をずらすことで誘起した。マイクロモーションが増大したイオンの蛍光スペクトルはドップラー広がりとは異なり特徴的なスペクトル形状を呈する。このスペクトルを用いてマイクロモーションエネルギーを校正した。

測定した散乱断面積のエネルギー依存性から散乱のメカニズムはランジュバン散乱で説明でき、測定エネルギー領域では古典的な散乱であることを示した。また、散乱断面積はカルシウムイオンの内部状態ごとに異なった。この内部状態間の反応性の差がポテンシャルエネルギーカーブの状態間の状態の結合の有無によって説明できることを共同研究により明らかにした。

以上のように本研究は内部量子状態を光によって制御し、実験で得られた状態による反応性の違いを個々の状態におけるポテンシャルエネルギーカーブから得られる情報と比較することで非弾性散乱過程の理解を目指したものである。これは本来、散乱過程がそれぞれの状態ごとに理解されるべきであることを端的に示した結果と言える。本研究で得られた知見は非弾性散乱過程の理解に加え、実験者による散乱過程の制御手法の開発といった観点からも有益であると考えられる。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 齋藤 了一

審査委員主査 中川 賢一

委員 岸本 哲夫

委員 渡辺 信一

委員 齋藤 弘樹

委員 向山 敬

本研究はレーザー冷却技術を駆使し、絶対零度近傍の中性原子トラップとイオントラップ装置を組み合わせることによって、ミリケルビン以下の極低温下における原子-イオン間衝突を詳細に調べたものである。中性原子とイオンの衝突は、イオンが発する電場により作られた中性原子の分極が電場と相互作用することにより引き起こされる引力相互作用が起源となり、中性原子期待同士の衝突と比べて比較的長距離に及ぶために低音領域に至るまで古典的な衝突過程として考えることができる。しかし、イオンや原子の温度がマイクロケルビンという、中性原子の実験で言えばボース凝縮やフェルミ縮退の実現の際に到達する温度領域になると原子イオン間の散乱でさえも量子的になり、わずかな数の角運動量の部分波のみが散乱に寄与する状況を作ることができる。さらにそのような状況においては原子とイオンが散乱する際に中性原子同士の持つ量子統計性が原子イオン間の散乱に影響を及ぼすことは想像に難くない。本研究の最終的な目標は原子とイオンの散乱の際に中性原子が持つ量子統計性がどのようにその衝突過程に影響を与えるかを明らかにし、物質が持つ物理的、化学的性質と量子統計性の間の関係を詳細に理解することを目的としたものである。

このような興味で進められている研究は冷却原子イオン系に限らず低温領域での衝突の研究は様々な手法で様々な分野の研究者によって行われている。主には衝突させたい原子や分子を射出し、その原子線や分子線をできるだけ平行にすることで衝突する2つの粒子の相対速度をできるだけ遅くすることによって衝突エネルギーを小さくするという手法がとられてきた。この手法は様々な理由によって限界があり、実際に到達できるのはせいぜい数ミリケルビンという衝突エネルギー領域であった。齋藤氏のすすめる本研究の手法では原子とイオンをレーザー冷却の手法によりマイクロケルビンの温度領域に到達させることにより、これまで実現できていた温度領域の低温側の限界を3桁下げることができる可能性がある。さらに、分子線を用いた研究と異なり、本研究では衝突対象が共に真空中に

孤立した状態で捕獲されていて外乱の影響を受けづらいこと、衝突後の生成物が真空中に孤立した状態で捕獲できるために生成物の量子状態などの評価が行いやすいこと、衝突物の量子状態を光によって精密に制御することが可能であること、などこれまで進められてきた手法とは全く異なる利点を持った独創的な研究であると言える。

本研究では様々な衝突過程の中で、特に電荷交換衝突過程に着目して研究が行われた。中性原子にはフェルミ同位体のリチウム原子を、イオンにはカルシウムイオンを用い、その両者を同一真空槽中に捕獲することで両者の間に生じる衝突過程を調べた。この研究ではイオンの持つ運動エネルギーを系統的に制御性よく変える手法を開発し、その手法を用いて電荷交換衝突断面積の衝突エネルギー依存性を詳細に調べることに成功している。イオンは定常電場ではなく振動する電場によって捕獲されているため、常にわずかに振動電場に同調した運動を持っている。通常はこの運動は余計な運動エネルギーをイオンが持つことを意味するためできるだけ抑制しようとするが、本研究ではこの振動電場に同調した運動があえて大きくなるような条件を用いることにより、イオンにエネルギーを与えるという手法をとった。また、与えられたエネルギーはイオンの励起スペクトルの形状から算出できることを見出し、この両方の手法を組み合わせることでイオンの運動エネルギーの制御を可能にした。電荷交換衝突の衝突エネルギー依存性の情報により、イオンの量子状態によって電荷交換衝突のレートが大きく異なること、さらに比較的衝突レートの高い準安定状態にイオンを準備した際には原子イオン間の原子核が近づくような衝突をした際に数回に1回程度の割合で電荷交換が起こり、それ以外は弾性衝突をしているという状況を実験的に明らかにすることに成功した。さらに理論研究者と共同研究を行うことにより、この電荷交換衝突がどのようなエネルギー準位を辿って生じているかということも明らかにすることができている。

以上のように本研究はイオンの内部量子状態を制御した上で原子イオン間の電荷交換衝突を誘起し、さらにイオンの運動エネルギーを制御する手法を用いることによって1ケルビンから1ミリケルビンまでの温度領域における衝突過程を詳細に調べた。この成果は最終的な目標である量子統計性が衝突過程に与える影響を調べることができるマイクロケルビンの温度領域に到達するための重要なステップであると同時に、イオンの量子状態の違いからくる衝突断面積の違いなど理論研究者にとって取り込み方が自明でない自由度に起因した現象の観測もなされており、エネルギー準位計算に対して新たな情報を提供することもできている。本研究でもたらされた成果は量子エレクトロニクス、低温原子衝突という分野において重要な成果であり、申請者に博士(理学)を授与できると判断する。