

論文審査の結果の要旨

氏名 長谷川太郎

本論文は、 μ トラップ中での原子イオンの共同冷却に実験的に取り組んだもので、全体として7章から構成されている。第1章の序論に引き続いて、第2章では本論文で用いた μ トラップ法の原理について、第3章ではイオンの冷却法について、それぞれレビューしている。第4章では、レーザー冷却された Mg^+ の蛍光スペクトル線の変形について、第5章では、イオンの共振減少を用いた Mg^+ の同位体分離法についての結果と考察を行っている。第6章では2種のイオンを同時にトラップした場合の共同冷却に関する研究がまとめられている。第7章は今後の発展も含めたまとめになっている。

本論文の第一の成果は、レーザー冷却された Mg^+ の蛍光スペクトル線の変形を見出し、その原因を究明したことである。レーザー冷却の効果を高めるためには μ トラップのポテンシャルを浅くし、レーザー強度を上げる必要がある。その場合、蛍光スペクトル線のプロファイルに非対称な変形が起こることを見出した。そして、その変形が、レーザー光子によるイオンの移動に起因することを提案し、観測されたスペクトル線の変形がそのモデルによって説明できることをシミュレーションで確かめた。

本論文の第二の成果は、イオンの共振現象を用いた Mg^+ の同位体分離を実現したことである。レーザー冷却では一つの同位体しか冷却できないので、複数の同位体を含む原子では、冷却効率が落ちる。それを避けるためには、不必要な同位体の除去が必要である。そのために、トラップ中のひとつの同位体イオンの共振周波数と同じ振動数の交流電場を加えて強制振動を起こし、その同位体イオンをトラップから除去する方法を提案し、実現した。この原理は単純であるが、実際に実現するには、強制振動を起こさせる電場の強度の選択や、残したい同位体イオンに対するレーザー冷却など、重要な工夫が必要であった。結果として、5000個以上の $^{24}Mg^+$ のみからなるイオン集団を生成でき、共同冷却の寒剤として利用できるようになった。

本論文の最も主要な成果は、共同冷却を実現したことである。寒剤のイオンとしては、上記の方法で生成した $^{24}Mg^+$ を用い、ゲストイオンとしては Ba^+ を用いた。 Ba^+ の生成には、 Ba 原子と $^{24}Mg^+$ の電荷移動を利用するという独創的な方法を採用している。これによって質量の大きく異なる2つのイオンを同時トラップし、かつ、 Ba^+ が $^{24}Mg^+$ によって500 K程度まで冷却されていることを Ba^+ の光-光二重共鳴蛍光スペクトルを測定して確かめた。このような共同冷却が起こっているとき、ゲストイオンの μ トラップにおける共振周波数が単体イオンのものより大きくずれていることを見出した。このことは、 Ba^+ 以外に Ca^+ 、 Zn^+ 、 Sr^+ 、 Yb^+ でも観測された。そのような共振周波数のずれは、ホストイオン集団とゲストイオンの2体の間の相互作用を考えることによって説明できることを示した。

このように、本論文では、様々な予備実験の努力を通して、 μ トラップを用いた原子イオンの共同冷却を初めて実現するとともに、共同冷却のメカニズムを共振周波数の変化をもとに詳しく解明した。この成果は、今後、同様な方法による共同冷却を行う上で貴重な指針を与えるものであるとともに、高分解能分光や周波数標準への応用への基礎をなす重要なものである。また、本論文における研究は、共同研究者の助言の下に、すべて論文提出者が自ら着想し実行したものである。よって、論文提出者は博士(理学)の学位を授けるにふさわしいと判断する。