

静電型イオンビームトラップの技術とその応用



齊藤 学

京都大学大学院工学研究科
saito@nucleng.kyoto-u.ac.jp



春山 洋一

京都府立大学大学院生命環境科学研究科
haruyama@kpu.ac.jp

一般的にイオントラップといえば、交流電場あるいは静電場と静磁場によってイオンを狭い空間に閉じ込めるRFトラップやペニングトラップを思い浮かべるであろう。これに対し、本稿で紹介する静電型イオンビームトラップは、これまでのトラップとは異なり、一定の速さで特定の方向に走らせた状態のイオンビームを静電場だけで空間に閉じ込める装置である。

静電型イオンビームトラップの閉じ込め方法は、向かい合った2組の反射鏡の間で光線を反射し続ける光共振器の原理に基づいている。この反射鏡を反射電極によって置き換えた装置が、静電型イオンビームトラップである。このトラップは、共振器における光線の閉じ込めと同様に、対向した2組の反射電極の間でイオンビームを直線的に往復運動させ続ける。これによってトラップ内にイオンビームが蓄積する。また、反射電極間はフィールドフリーの空間になっており、イオンビームは一定の速さでこの領域を走行する。

静電型イオンビームトラップを原子分子物理研究に用いる利点はいくつかある。たとえば分子イオンの衝突実験の場合を考えてみよう。イオン源で実際に生成される分子イオンは、イオン化過程で与えられたエネルギーによって様々な振動励起状態になっている。通常、この励起状態の寿命はイオン源から衝突点までのイオンの走行時間より長い。そのため、基底状態や特定の

振動状態のイオンビームを衝突実験に用いることは難しい。これに対して、イオンビームトラップに分子イオンを長時間蓄積すれば、放射脱励起によって振動状態の落ちついた冷却分子イオンビームが生成し、それを衝突実験に供することができる。また、蓄積しているイオンビームと電子ビームやレーザー光との衝突実験がトラップ内でもできることも利点のひとつである。衝突によって励起したイオンには非常に長い寿命の脱励起(放射、電離、解離など)を起こすイオンも存在する。衝突後の蓄積されたままのイオンビームを観測することで、この長寿命の反応を時間を追って調べることが可能になる。さらに、反応で生じたイオンからの中性生成物が電極で反射されずに直進してトラップより出てくるため、それを検出することが容易である。この中性粒子検出を利用して蓄積されているイオンの量を精度良くモニターすることもできる。

我々は、静電型イオンビームトラップの特長を生かして Kr^{2+} イオンの 1S_0 準安定状態の精密寿命測定を行った。その結果、理論計算値とよく一致する値が得られている。また他の研究グループは最近、小型なトラップ全体を冷却チェンバーで囲むことで10 K程度まで冷やし、極冷却イオンを用いた分光実験や衝突実験に成功している。今後、静電型イオンビームトラップを用いた原子、分子科学の実験研究がますます展開すると予想される。

—Keywords—

イオントラップ:

電磁場によって作ったポテンシャルの井戸にイオンを長時間ためておく装置。静電場だけではイオンを空間に閉じ込めることができないため(アーンショウの定理と呼ばれる)、高周波電場または静電場と静磁場の組み合わせを用いたトラップが主に使われている。

放射脱励起:

原子分子が、電子や振動、回転の励起状態からよりエネルギーの低い状態へ、エネルギーの変化分を光として放出して移る遷移のこと。自発的に生じる自発放射脱励起と外部放射による刺激によって生じる誘導放射脱励起がある。ここでは自発放射脱励起を意味している。

極冷却イオン:

並進運動のエネルギーおよび電子状態や振動回転運動の内部自由度に関係するエネルギーをより0 Kに近い温度まで減少させたイオンのこと。イオンビームトラップ全体を冷却することでイオンビームを囲む物質からの黒体放射の影響が抑えられ、電子、振動、回転状態がほぼ基底状態にあるイオンのビームを作ることが可能になる。