

## 論文審査の結果の要旨

氏名 王 海鳴

本論文は、中性子ハロー核、すなわち、中性子の一部が通常の原子核半径を大きく越えて滲み出している原子核として代表的な、 $^{11}\text{Li}$  原子核の荷電半径を、レーザー分光法によって測定するための実験手法の開拓についてまとめたものである。論文は6章からなり、第1章では研究目的、第2章では  $^{11}\text{Li}$  荷電半径測定に必要な原子物理学および原子核物理学のレビュー、第3章ではレーザー分光法の検討、第4章では実験装置全体の記述、第5章では論文提出者が中心となって行って開拓した実験手法の検証、第6章ではまとめと今後の展望を述べている。

通常、原子番号  $A$  の原子核の半径は約  $1.2 \times A^{1/3} \text{fm}$  であるとされている。しかし、80年代に、原子核反応断面積の測定から、中性子過剰核（中性子数  $>>$  陽子数）においては、原子核半径が通常の値よりもはるかに大きいことが見いだされた。 $^{11}\text{Li}$  はその代表的なものである。 $^{11}\text{Li}$  では、 $^9\text{Li}$  のコアにゆるく束縛された2個の中性子が、通常の核半径よりもはるかに遠方に滲み出していると考えられている。しかし、反応断面積の測定だけでは、核内の陽子と中性子の広がりやを区別することができないため、コア部分を形成する核子がハローによってどれくらい影響を受けているのかといった基本的な問題が未解決である。この点から現在、リチウム同位体の荷電半径（陽子分布）の測定に多大な関心が持たれている。

高分解能レーザー分光法は、不安定原子核の荷電半径を測定する唯一の方法と考えられる。リチウム原子の準位間の遷移エネルギーが各同位体によって変化する量（同位体シフト）を高分解能レーザー分光で測定し、既知の  $^6, ^7\text{Li}$  を基準として他の同位体の荷電半径を導出するという方法である。この同位体シフトは、各同位体の質量の違いに由来する寄与（質量シフト）と原子核中の正電荷の広がりからの寄与（体積シフト）の二つの成分の和であり、後者の部分だけが荷電半径の情報を含んでいる。そこで、この測定された同位体シフトから質量シフトの精密な理論値を引くことで、原子核モデルに依存することなく荷電半径を求めることができる。ちなみに、リチウム同位体の平均二乗荷電半径を2%の精度で決定するのに必要な分光精度は200 kHz である。

$^{11}\text{Li}$  は原子核反応を用いて稀にしか作ることの出来ない短寿命アイソトープで、高精度を達成するためには、四つの実験技術上の開拓が必要である。すなわち、1) 十分な数の  $^{11}\text{Li}$  原子核をイオン・キャッチャー・フォイルに止め、中性原子として取り出すこと、2) 二光子励起と共鳴イオン化法による高精度分光、3) レーザー周波数を高い精度で安定化すること、4) 共鳴イオン化法で得られた  $^{11}\text{Li}$  イオンを高い S/N で検出すること、である。以下、その各々について詳細を述べる。

1)  ${}^{11}\text{Li}$  原子の供給：論文提出者は、入射核破砕を使った RIPS/RIKEN とオンライン質量分離器を用いた ISOLDE/ISOL 施設の詳細比較を行い、ISOL が適していると結論した。そこで、ドイツの GSI 研究所のオンライン質量分析器からの  ${}^7\text{Li}$  ビームをキャッチャーフォイルに止めて中性原子に変換するテスト実験を行い、 $2400^\circ\text{K}$  以上に熱したカーボン薄膜を用いれば、リチウムを 50%以上の効率で中性原子として再放出できることを示した。また、レーザーイオン化以外のメカニズムで作られるバックグラウンド・イオンをおさえるための、バックグラウンド除去電極を設計した。

2) レーザー分光法の確立：基底状態  $2\text{S}$  から  $3\text{S}$  状態への二光子遷移を用い、ドップラー幅をキャンセルすることにより、高分解能を達成する。 $3\text{S}$  状態から自発的に  $2\text{P}$  状態に遷移した原子を、共鳴イオン化法によって  $3\text{D}$  中間状態を経由して効率的にイオン化し、発生するイオンを質量分析して、十分高い S/N 比の下でスペクトル測定を行う。論文提出者は、安定リチウム同位体  ${}^7\text{Li}$  を使ったテスト実験を行い、高い S/N 比が得られることを実証した。

3) レーザー周波数の安定化：先に述べたように必要な周波数精度はおよそ  $200\text{kHz}$  である。これを実現するため、 $2\text{S}\rightarrow 3\text{S}$  遷移を引き起こす  $\text{Ti}:\text{Sa}$  レーザーを、 $735\text{nm}$  の参照用半導体レーザーに対し、RF-オフセットロックで安定化する。さらにこの参照用半導体レーザーをヨウ素分子の遷移を標準周波数として安定化する。 $600^\circ\text{C}$  に加熱したヨウ素セルを用いて飽和分光を行った結果、目標周波数近傍に S/N 比 300 の共鳴線が発見され、これにレーザーを固定することで、 $30\text{kHz}$  の周波数精度が得られることを示した。

4) イオンの質量分析：共鳴イオン化法で得られたリチウムイオンは、市販の四重極質量分光器 (QMS) で検出する。論文提出者は、安定リチウム同位体 ( ${}^6, {}^7\text{Li}$ ) を用いてこの QMS による質量ピークの形状を測定し、他の核種によるバックグラウンドを  $10^{-7}$  の比率で抑制できることを確認した。

以上、本研究により、 ${}^{11}\text{Li}$  の荷電半径測定の実現に必要な基本技術が出揃った。なお、 ${}^{11}\text{Li}$  を用いた実験は、CERN において 2~3 年後に実施される予定である。

本論文第 5 章は、ドイツ GSI 研究所の Kluge 博士らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験を実施し、分析・検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士 (理学) の学位を授与できると認める。